Paweł Madejski, Piotr Żymełka

Wprowadzenie do komputerowych obliczeń i symulacji pracy systemów energetycznych w programie STEAG Ebsilon®Professional

WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2020

kiem jawnym i niejawnym: 11386653A6434306

Paweł Madejski, Piotr Żymełka

Wprowadzenie do komputerowych obliczeń i symulacji pracy systemów energetycznych w programie STEAG Ebsilon®Professional

WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2020

Plik zabezpieczony watermarkiem jawnym i niejawnym: 11386653A6434306

KU 0722 pozycja wydawnictw dydaktycznych
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2020
ISBN 978-83-66364-70-7
e-ISBN 978-83-66364-71-4

Redaktor naczelny Wydawnictw AGH: *Jan Sas*

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:
Andrzej Pach (przewodniczący)
Jan Chłopek
Barbara Gąciarz
Bogdan Sapiński
Stanisław Stryczek
Tadeusz Telejko

Recenzenci:
prof. dr hab. inż. Stanisław Gumuła
prof. dr hab. inż. Janusz Badur

Autorzy:
dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska
mgr inż. Piotr Żymełka
PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna

Redakcja: *Monika Filipek*

Skład komputerowy: *Andre*

Zdjęcie na okładce: *Jakub Barzycki*

Projekt okładki i stron tytułowych: *Paweł Sepielak*

Wydawnictwa AGH
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38
e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl
http://www.wydawnictwa.agh.edu.pl

Spis treści

Streszczenie 5

1. Wprowadzenie 7
Literatura 8

2. Program Ebsilon®Professional 10
2.1. Komponenty 10
2.2. Połączenia komponentów 13
2.3. Definiowanie danych wejściowych 16
2.2. Moduły wspomagajace pracę w programie Ebsilon®Professional 19
Literatura 24

3. Elektrownie i elektrociepłownie parowe 25
3.1. Wprowadzenie teoretyczne 25
3.1.1. Analiza obiegu siłowni parowej 25
3.1.2. Analiza pracy kotła parowego na paliwo stałe 31
3.2. Ćwiczenia praktyczne 38
Ćwiczenie 1. Model kondensacyjnej siłowni parowej 38
Ćwiczenie 2. Model kondensacyjnej siłowni parowej z przegrzewem wtórnym 49
Ćwiczenie 3. Model elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej 56
Ćwiczenie 4. Model bloku elektrociepłowni z turbiną przeciwprężną 62
Ćwiczenie 5. Model bloku elektrowni na parametry nadkrytyczne 72
Ćwiczenie 6. Model kotła pyłowego 80
Literatura 93

4. Elektrownie i elektrociepłownie gazowo-parowe 94
4.1. Wprowadzenie teoretyczne 94
4.1.1. Obieg porównawczy elektrowni gazowej 95
4.1.2. Wskaźniki i parametry sprawnościowe wykorzystywane do oceny pracy elektrowni gazowej 97

4.2. Ćwiczenia praktyczne 99
Ćwiczenie 1. Model turbiny gazowej 99
Ćwiczenie 2. Zaawansowany model turbiny gazowej – wykorzystanie bilbioteki OEM-GTLib 106
Ćwiczenie 3. Model elektrowni gazowej 114
Ćwiczenie 4. Model elektrowni gazowo-parowej 125
Ćwiczenie 5. Model elektrociepłowni gazowo-parowej 135
Literatura 145

5. Rozwiązania inżynierskie i systemy informatyczne wykorzystujące program STEAG Ebsilon®Professional 146
5.1. SR::EPOS – zarządzanie sprawnością i optymalizacja 146
5.2. SR::SPC – analityka predyktywna 147
5.3. SR::SPC ML – predykcja *machine learning* 147
5.4. SR::BCM – optymalizacja zdmuchiwaczy 148
5.5. SR::Validate 148
5.6. SR::SPM – monitoring rurociągów pary świeżej 149
Literatura 149

6. Podsumowanie 151
Literatura 153

Streszczenie

Zakres tematyczny prezentowanej książki obejmuje omówienie podstaw i wprowadzenie do modelowania systemów energetycznych z wykorzystaniem oprogramowania Ebsilon®Professional firmy Steag. Zaprezentowane zagadnienia są skoncentrowane wokół technologii energetycznych najczęściej stosowanych w Polsce do produkcji energii elektrycznej i ciepła w elektrowniach oraz elektrociepłowniach zawodowych. Dobór przykładów oraz podział książki został opracowany tak, aby uszeregować omawiane zagadnienia, techniki modelowania i analizowania wyników pod względem stopnia złożoności. Książka została podzielona na sześć rozdziałów. Rozdział 1 zawiera krótkie wprowadzenie oraz opis najbardziej aktualnych wyzwań, które wpływają na dynamiczny rozwój stosowanych modeli oraz metod komputerowych w energetyce. W rozdziale 2 zaprezentowane zostały podstawy budowy modeli, doboru komponentów, definiowania danych wejściowych. W rozdziale 3 znaleźć można zadania wymagające opracowania modeli termodynamicznych parowych układów energetycznych poprzedzone wprowadzeniem teoretycznym dotyczącym wykorzystywanego obiegu Clausiusa–Rankine'a. Trudność oraz poziom złożoności zadań rośnie wraz z kolejnymi przykładami, na które składają się modele siłowni parowej, siłowni parowej z przegrzewem pary, elektrociepłowni, bloku elektrowni na parametry nadkrytyczne oraz kotła węglowego. Rozdział 4 przedstawia zagadnienia związane z modelowaniem układów gazowych i gazowo-parowych. Podobnie jak wcześniejszy został poprzedzony teoretycznym wprowadzeniem dotyczącym obiegów gazowych Joule'a–Braytona. W rozdziale tym znajduje się szczegółowy opis budowy modeli turbin gazowych, modelu elektrowni gazowej, elektrowni gazowo-parowej oraz elektrociepłowni gazowo-parowej. W rozdziale 5 scharakteryzowane zostały systemy i narzędzia informatyczne bazujące na modelach termodynamicznych i programie Ebsilon oraz ich główne zastosowania i funkcjonalności. Całość została podsumowana w rozdziale 6.

1. Wprowadzenie

Duże krajowe koncerny energetyczne przykładają obecnie ogromną wagę do rozwoju nowych technologii niskoemisyjnych, które to (oprócz budowy nowych bloków gazowych, gazowo-parowych oraz farm wiatrowych) stanowią strategiczny obszar działań inwestycyjnych energetyki zawodowej w Polsce. Powodem takiego podejścia są w szczególności zmiany w warunkach otoczenia, które sprawiają, że rozwój technologii niskoemisyjnych będzie głównym kierunkiem inwestowania oraz prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w kolejnych latach. W czasie podejmowania decyzji dotyczących działań inwestycyjnych, takich jak budowa instalacji oczyszczania spalin, kontraktowanie dostaw paliwa (węgiel, biomasa, gaz), prognozowanie produkcji ciepła i energii elektrycznej, kontraktowanie planowanej sprzedaży energii elektrycznej i ciepła oraz planowanego zakupu paliw (m.in. udział w rynku mocy funkcjonującym w Polsce od 2018 roku), niezbędne jest wykonywanie złożonych analiz techniczno-ekonomicznych. Pozwalają one ocenić korzyści oraz ryzyka związane z planowanym działaniem, jak również prowadzić rzetelny nadzór nad procesem produkcji energii elektrycznej i ciepła. Dużym wsparciem podczas przeprowadzania tego typu analiz okazują się szczegółowe modele bloków energetycznych, które z dużą dokładnością pozwalają wyznaczyć podstawowe parametry techniczne bloku energetycznego, tworząc swojego rodzaju wirtualną elektrownię (*virtual power plant*), będącą bliźniaczą kopią rzeczywistego lub planowanego obiektu (*digital twins*).

Programy pozwalające na tworzenie własnych modeli termodynamicznych w celu przeprowadzania symulacji i analizowania skomplikowanych struktur systemów energetycznych są dostępne i stosowane już od pewnego czasu. Najbardziej znane oraz dostępne narzędzia to m.in. Ebsilon®Professional (wykorzystywany w niniejszej książce), AspenPlus, Thermoflex, GateCycle, Engineering Equation Solver, Dymola Modelica, COM-GAS czy DIA-KART [1.1–1.7]. Ogromną zaletą nowoczesnych programów do symulacji i projektowania systemów energetycznych jest możliwość ich połączenia z systemami rejestracji i archiwizacji danych, co umożliwia użytkownikowi prowadzenie obliczeń eksploatacyjnych w trybie *on-line* lub odzwierciedlenie stanu pracy bloku

energetycznego w minionym okresie jego eksploatacji. Widoczny obecnie bardzo silny rozwój narzędzi i systemów informatycznych dla energetyki wynika z potrzeb nadzorowania procesów przemysłowych, projektowania i optymalizacji istniejących systemów. Kierunek ten jest zgodny z ogólnoświatowym trendem i założeniami przemysłu 4.0.

Wyniki modelowania komputerowego obiegów i procesów zachodzących w maszynach i urządzeniach energetycznych pozwalają m.in. na:

- wyznaczanie niemierzonych parametrów eksploatacyjnych oraz wskaźników w celu oceny energetycznej, sprawnościowej i techniczno-ekonomicznej na podstawie przeprowadzanych obliczeń;
- bilansowanie obiegów bloków parowych, gazowo-parowych oraz kogeneracyjnych bez konieczności dysponowania wszystkim wartościami pomiarowymi;
- lepsze poznanie procesu oraz zmian parametrów pracy całego układu dzięki modyfikacjom wybranego fragmentu systemu energetycznego;
- symulowanie różnych stanów pracy elektrowni i elektrociepłowni;
- optymalizację wybranych parametrów pracy układu dzięki symulacjom różnych konfiguracji jego pracy;
- przeprowadzanie analiz termodynamicznych złożonych obiegów parowych oraz gazowo-parowych;
- dobór parametrów nominalnych urządzeń na etapie projektowania systemów energetycznych.

Opracowanie własnego modelu układu energetycznego jest jednak procesem skomplikowanym i wymagającym dużego nakładu czasu oraz wiedzy niezbędnej do zweryfikowania najważniejszych założeń oraz walidacji wyników obliczeń. Głównym celem i zamysłem autorów podczas opracowania zadań prezentowanych w książce było przejrzyste wprowadzenie do podstaw teoretycznych oraz technik wykorzystywanych w czasie modelowania matematycznego systemów energetycznych. Opanowanie przedstawionych zagadnień i umiejętności, takich jak budowanie modeli czy wykonywanie symulacji oraz analiz technicznych, z pewnością umożliwi i ułatwi dalszą samodzielną pracę w zakresie modelowania matematycznego bardziej rozbudowanych i zaawansowanych systemów energetycznych.

Literatura

[1.1] Steag Energy Services: As versatile as a planning tool can be, https://www.ebsilon.com [dostęp: 24.07.2020].

[1.2] Aspentech: Aspen Plus, https://www.aspentech.com/products/engineering/aspenplus [dostęp: 24.07.2020].

[1.3] Thermoflow: Products. Overview, https://www.thermoflow.com/products_overview.html [dostęp: 24.07.2020].
[1.4] Wyat Enterprises, LLC: GateCycle, http://www.wyattllc.com/GateCycle/GateCycle.html [dostęp: 24.07.2020].
[1.5] F-Chart Software: Overview, http://www.fchartsoftware.com/ees/ [dostęp: 24.07.2020].
[1.6] Modelica Association: https://www.modelica.org/ [dostęp: 24.07.2020].
[1.7] Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk: CFM w zastosowaniach przemysłowych, https://www.imp.gda.pl/osrodki-naukowe/o2/o2z3/badania/cfm [dostęp: 24.07.2020].

2. Program Ebsilon®Professional

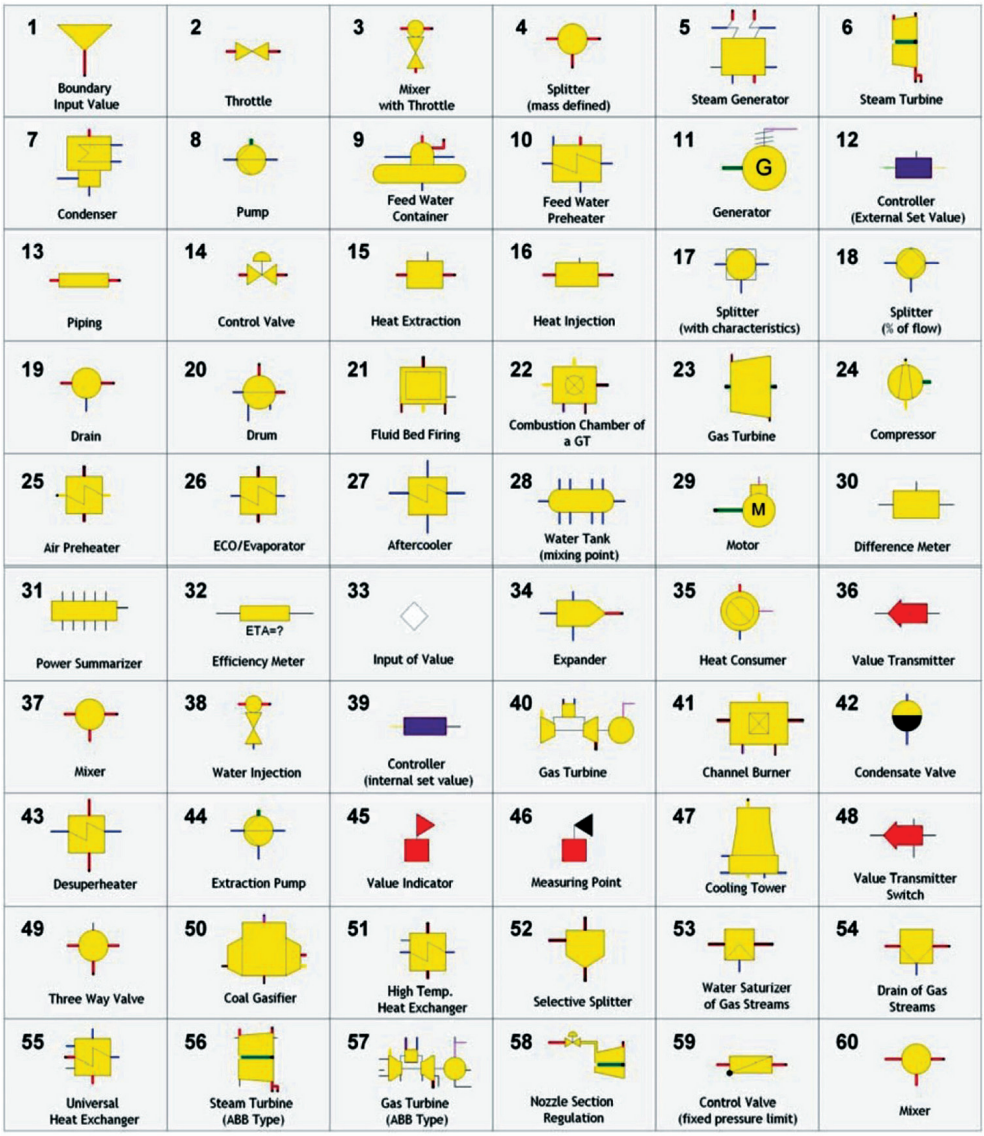
Metodologia budowy własnych modeli oraz przeprowadzanie obliczeń i symulacji komputerowych pracy układów energetycznych w programie Ebsilon®Professional firmy Steag [2.1] składa się z następujących trzech głównych etapów:

- **Etap 1:** wybór właściwych i zdefiniowanych w programie komponentów modeli fizycznych maszyn i urządzeń.
- **Etap 2:** właściwe połączenie poszczególnych komponentów.
- **Etap 3:** zdefiniowanie podstawowych danych wejściowych oraz charakterystyk maszyn i urządzeń.

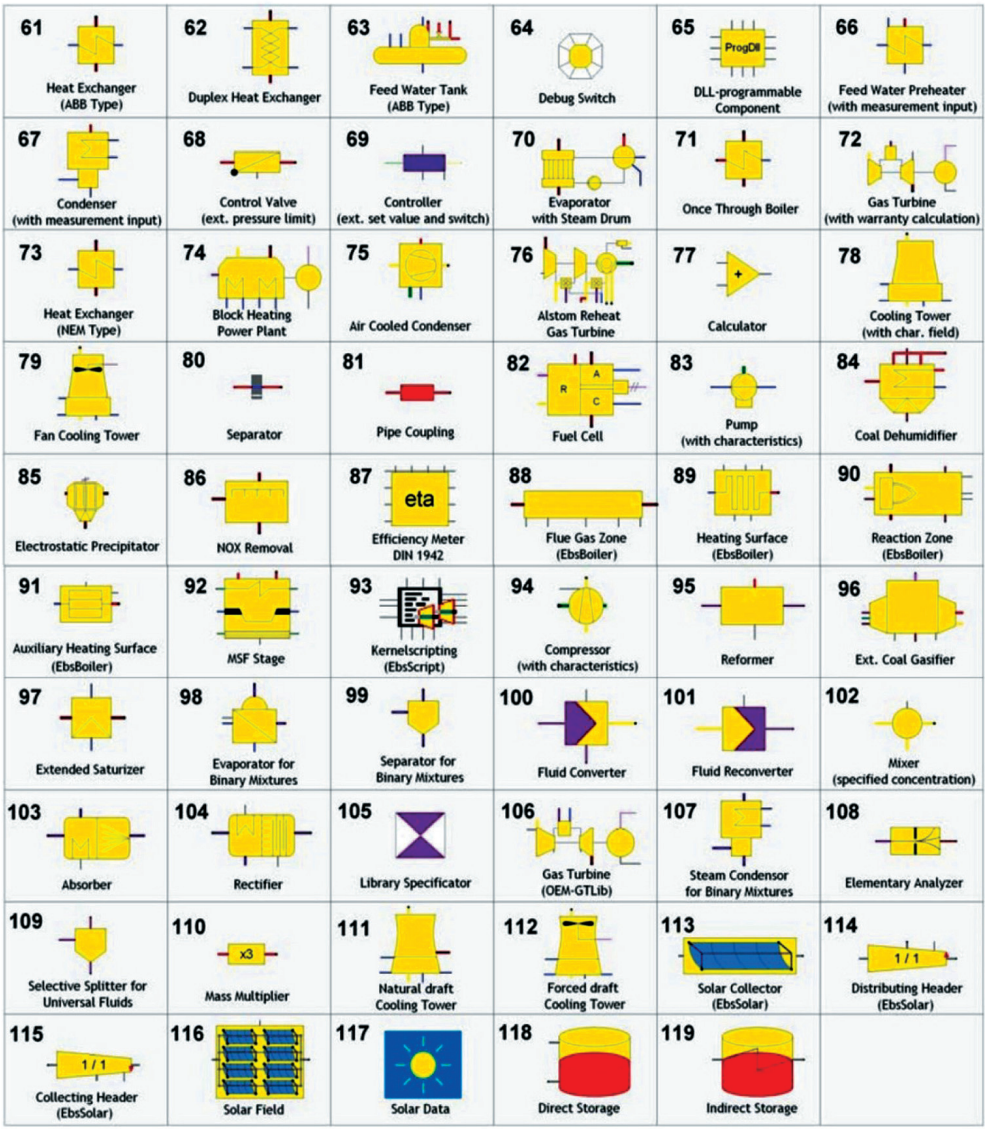
Poniższe podrozdziały zawierają ogólne wprowadzenie do poszczególnych etapów oraz opis ich charakterystycznych własności. Wychodząc z założenia, że najefektywniejszą formą nauki są ćwiczenia praktyczne, opis m.in. metod wyboru i łączenia komponentów, metod definiowania danych wejściowych, możliwości tworzenia wykresów, importu danych wejściowych i eksportu wyników do zewnętrznych aplikacji zaprezentowano w zamieszczonych przykładach. Rozwiązując zadanie dla wybranego zagadnienia, czytelnik będzie miał możliwość zaznajomienia się z różnymi możliwymi, czasami stosowanymi zamiennie i prowadzącymi do tych samych wyników, sposobami pracy. Wybór najlepszej metody oczywiście jest subiektywny i każdy powinien dokonać go samodzielnie, a zamysłem autorów książki było zaznajomienie czytelników z szerokim wachlarzem możliwości realizacji przedstawionych zadań.

2.1. Komponenty

W pełnej i bogatej bazie programu dostępnych jest ponad 150 różnych komponentów oraz ich modyfikacji. Ogólny ich przegląd przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Są to komponenty niezbędne do modelowania wszystkich rodzajów procesów termodynamicznych w elektrowniach węglowych, gazowych, gazowo-parowych, elektrociepłowniach, elektrowniach słonecznych, układach typu ORC, elektrowniach i ciepłowniach geotermicznych, spalarniach odpadów, zakładach odsalania oraz elektrowniach jądrowych.



Rys. 1. Baza podstawowych komponentów programu Ebsilon (1–60) [2.2]



Rys. 2. Baza podstawowych komponentów programu Ebsilon (61–119) [2.2]

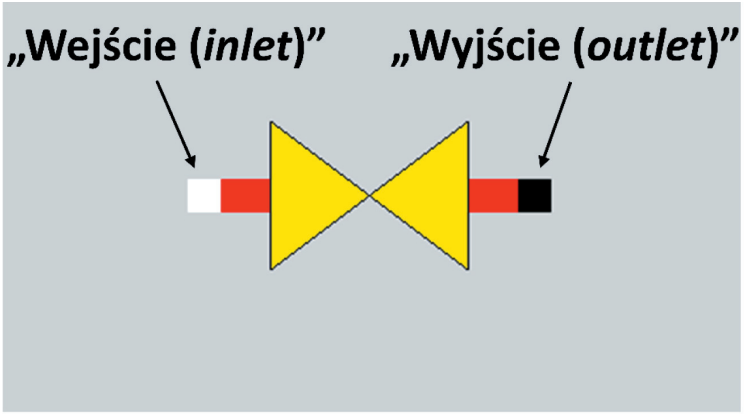
Komponenty możemy podzielić na:

- **komponenty modeli fizycznych:**
  - przepustnice, zawory, rurociągi (*throttles*, *valves*, *pipes*),
  - mieszalniki (*mixers*),
  - rozdzielacze (*splitters*),
  - generatory pary (*steam generators*),
  - turbiny (*turbines*),
  - pompy, sprężarki (*pumps*, *compressors*),
  - wymienniki ciepła (*heat exchangers*),
  - zbiorniki, komory, młyny (*tanks*, *headers*, *mills*),
  - silniki, generatory (*motors*, *generators*),
  - odbiorniki (*consumers*),
  - separatory (*separators*),
  - reaktory (*reactors*),
  - gazyfikatory węgla (*coal gasification*),
  - kolektory słoneczne, turbiny wiatrowe (*solar and wind components*),
- **komponenty logiczne:**
  - kontrolery (*controllers*),
  - moduły obliczeniowe (*calculators*),
  - przetworniki sygnałów (*converters*),
- **komponenty definiowania zmiennych wejściowych**, na które składają się warunki brzegowe (*boundary input value*, *measured value input*) i początkowe (*general input value* / *start value*),
- **komponenty programowane przez użytkownika** (*kernel*, DLL).

Ogólny przegląd stosowanych podstawowych komponentów modeli fizycznych przedstawiony został na rysunkach 1 i 2.

2.2. Połączenia komponentów

Aby zbudować model, komponenty dostępne w programie należy w odpowiedni sposób ze sobą połączyć, stosując linie łączące, tzw. *pipelines*/*streams*. Linie reprezentują idealne połączenia pomiędzy komponentami (nie występują w nich straty) i pozwalają transferować wszystkie własności i parametry termodynamiczne czynnika pomiędzy komponentami. Podstawowe parametry definiowane lub obliczane w komponencie i przenoszone z wykorzystaniem połączeń to temperatura, ciśnienie, entalpia (strumień energii) i masa. Na podstawie obliczonych wartości wyznaczane mogą być także moc, strumień objętościowy, entropia i egzergia. Każde połączenie w modelu ma dwa rodzaje przyłącza: wejście (*inlet*) oraz wyjście (*outlet*), oznaczone odpowiednio kolorem białym i czarnym (rys. 3). Zarówno wejście, jak i wyjście musi zostać podpięte do komponentów, zgodnie z zasadą wejście–wyjście (*inlet–outlet*) lub wyjście–wejście (*outlet–inlet*).



Rys. 3. Schemat przedstawiający wejście (*inlet*) do komponentu zaworu i wyjście (*outlet*) z niego

W programie zdefiniowane zostały różne linie łączące komponenty w zależności od medium, jakie transportują. Ich podział oraz ogólną charakterystykę przedstawiono w tabeli 1.

Zgodnie z zestawieniem zaprezentowanym w tabeli 1 połączenia definiują w sposób jednoznaczny, jaki czynnik przepływa pomiędzy komponentami. Program Ebsilon dysponuje rozbudowaną bazą i biblioteką materiałów, a własności płynów w połączeniach są automatycznie wyznaczane na podstawie dostępnych bibliotek. Podstawowe materiały, których biblioteki są dostępne w programie, to:

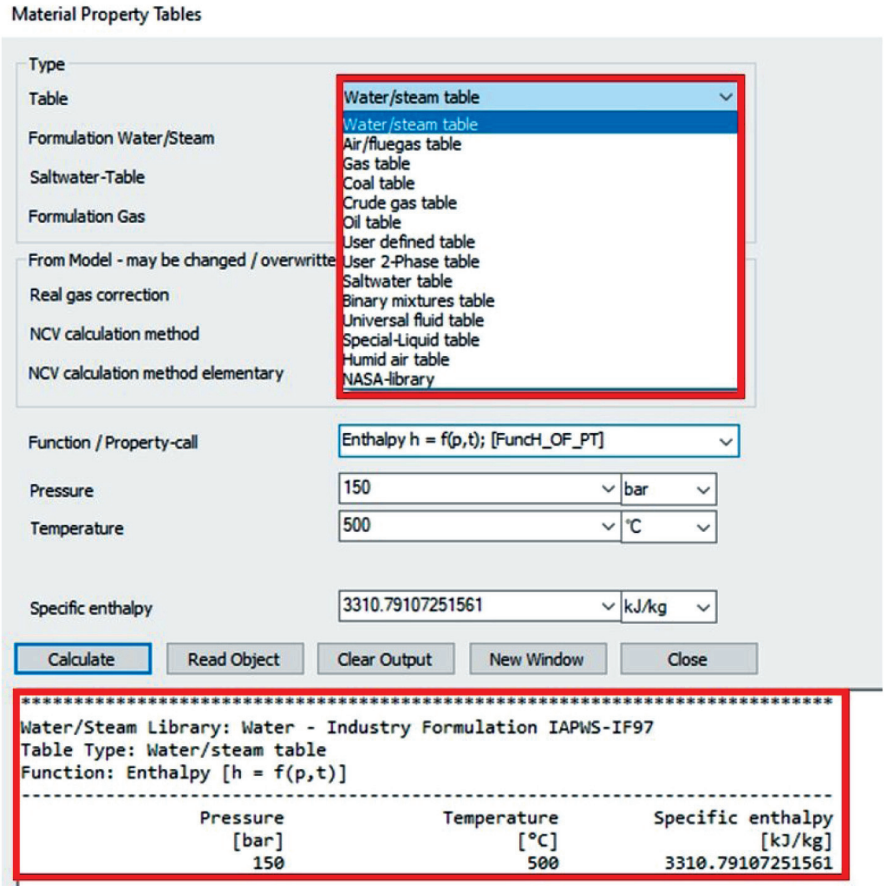
- woda i para wodna (IAPWS-IF97),
- materiały zgromadzone w bibliotece REFPROP (NIST):
  - 90 płynów od acetonu do ksenonu,
  - wilgotne powietrze,
  - słona woda,
  - ciecze termiczne mające zastosowanie w słonecznych elektrowniach cieplnych,
  - ciecze i mieszanki cieczy ORC,
  - płyny dwufazowe,
- mieszaniny binarne:
  - amoniak + woda,
  - bromek litu + woda,
- paliwa:
  - węgiel (dołączono bazę danych wartości kalorycznych),
  - olej,
  - gaz ziemny,
  - określone przez użytkownika, np. drewno.

Tabela 1

Charakterystyka podstawowych połączeń komponentów

Rodzaj czynnika	**Kolor**	**Kształt**	
powietrze	żółty	gruba linia	
para	czerwony	gruba linia	
olej	niebieskozielony	cienka linia	
woda	niebieski	cienka linia	
gaz	fioletowy	cienka linia	
spaliny	brązowy	gruba linia	
gaz naturalny	różowy	gruba linia	
węgiel/popiół	brązowy	cienka linia	
prąd elektryczny	różowy	cienka linia	
moc na wale	zielony	gruba linia	
planowana wartość	zielony	cienka linia	
aktualna wartość	żółty	cienka linia	
wartość logiczna	czarny	cienka linia	
wartość definiowana	pomarańczowy	cienka linia	
słona woda	zielony	cienka linia	
dwufazowa ciecz	jasnoniebieski	cienka linia	
dwufazowy gaz	jasnoniebieski	gruba linia	
uniwersalny płyn	fioletowy	cienka linia	
mieszanina binarna	fioletowy	gruba linia	
płyn termiczny	szary	cienka linia	

Własności płynów mogą być także wyznaczane w osobnym oknie z użyciem gotowego narzędzia *Fluid Properties Calculator*. Na rysunku 4 przedstawiona została możliwość wykorzystania kalkulatora do wyznaczenia entalpii właściwej pary wodnej $h = 3310{,}791$ kJ/kg, w funkcji temperatury i ciśnienia $h = f(p,t)$, dla zadanej wartości temperatury $t = 500$°C i ciśnienia $p = 150$ b, z zastosowaniem dostępnych tablic parowo-wodnych IAPWS-IF97.



Rys. 4. Kalkulator własności płynów jako dodatkowe narzędzie oprogramowania

2.3. Definiowanie danych wejściowych

Definiowanie danych wejściowych może zostać przeprowadzone na kilka sposobów, a wybór metody powinien zależeć przede wszystkim od rodzaju dostępnych da-

nych wejściowych, rodzaju planowanych do przeprowadzenia analiz, wykorzystanych w budowie modelu komponentów itp.

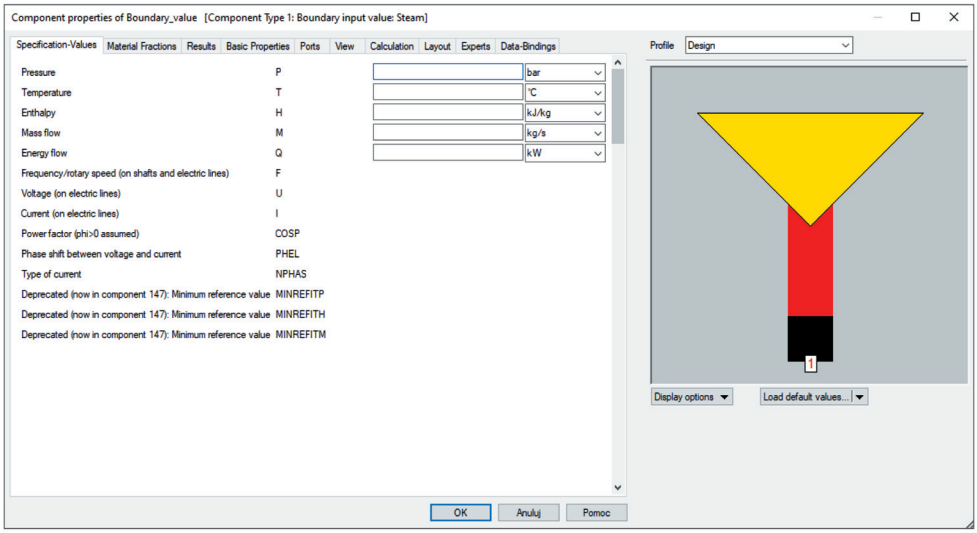
Poniżej zostaną omówione główne i najczęściej stosowane metody wprowadzania danych, tj.:

- definiowanie danych wejściowych w postaci warunku brzegowego w komponencie **Boundary input value (Comp 1)**,
- definiowanie danych wejściowych wewnątrz modelu na łączeniu komponentów z wykorzystaniem **General input value / start value (Comp 33)**,
- definiowanie danych wejściowych w **Measured value input (Comp 46)**,
- definiowanie wartości wewnątrz wybranego komponentu.

Definiowane danych wejściowych w postaci warunku brzegowego w komponencie Boundary input value (Comp 1)

Dane do modelu wprowadzane są w postaci warunku brzegowego i mogą to być następujące parametry (rys. 5):

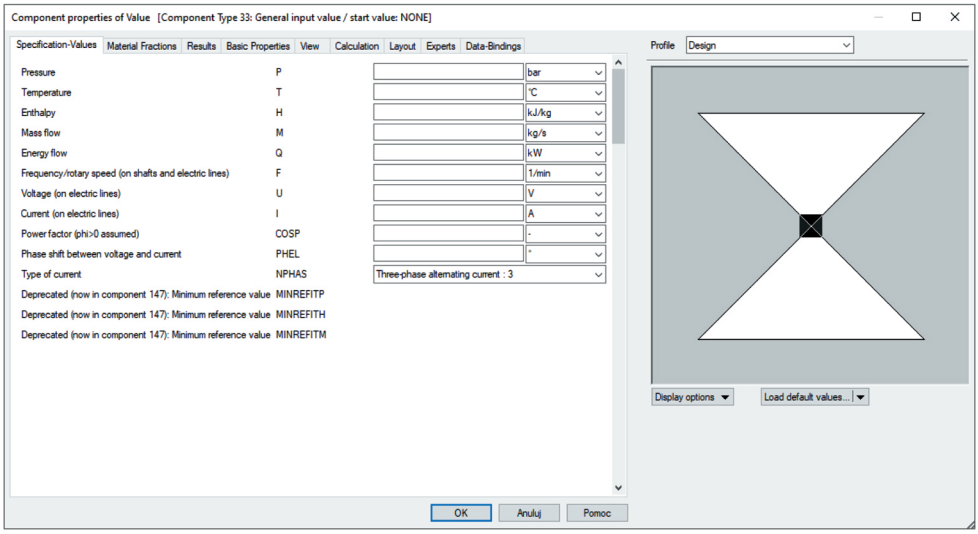
- ciśnienie – P (*pressure*),
- temperatura – T (*temperature*),
- entalpia – H (*enthalpy*),
- strumień masy – M (*mass flow*),
- strumień energii – Q (*energy flow*).



Rys. 5. Okno dialogowe komponentu **Boundary input value (Comp 1)**

Definiowanie danych wejściowych wewnątrz modelu na łączeniu komponentów z wykorzystaniem General input value / start value (Comp 33)

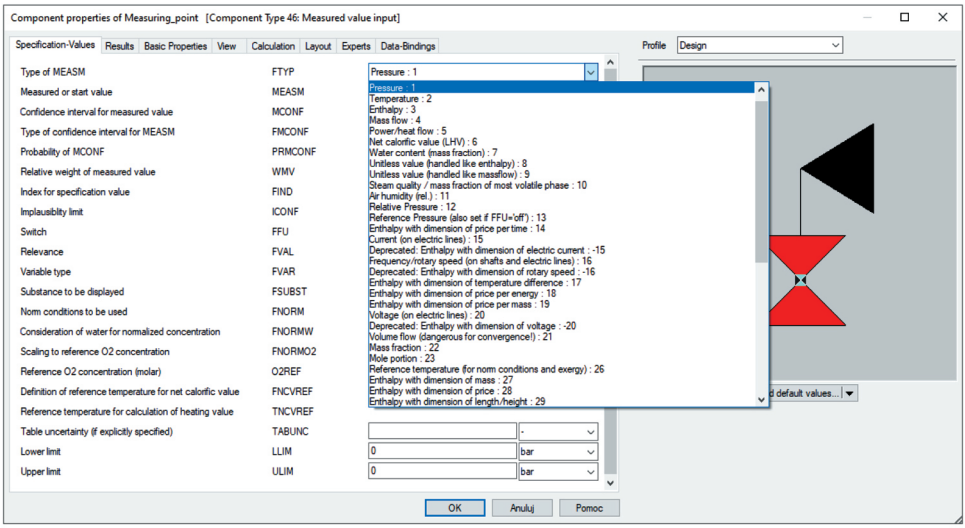
Komponent nr 33 różni się od komponentu nr 1 tym, że może zostać użyty w każdym punkcie modelu na liniach łączących komponenty. Za pomocą komponentu nr 33 można definiować te same wartości, co w przypadku komponentu nr 1 (rys. 6).



Rys. 6. Okno dialogowe komponentu **General input value / start value (Comp 33)**

Definiowanie danych wejściowych w Measured value input (Comp 46)

Jeśli chodzi o obliczenia i symulacje, komponent nr 46 jest podobny do komponentu nr 33. Jedyna różnica polega na tym, że w komponencie nr 46 można definiować tylko jedną wartość wybieraną z rozwijanej listy (rys. 7). Jeżeli chcemy zdefiniować kilka wartości, komponent nr 46 może zostać powielony i umieszczony na tej samej linii. W tym komponencie znajduje się także zdecydowanie więcej możliwych do wyboru parametrów definiujących dane wejściowe w porównaniu z komponentami nr 1 i 33. Pełna lista zawiera 79 pozycji. Komponent ma jedną ważną funkcję, a mianowicie możliwość wyłączenia opcji wprowadzania danej zmiennej do obliczeń bez konieczności usuwania komponentu z modelu. Aktywny komponent nr 46 jest reprezentowany przez czarną trójkątną flagę (rys. 7). Komponent ten może zostać także wykorzystany w procesie walidacji modelu, czyli porównania uzyskanych wyników modelowania z danymi otrzymanymi z pomiarów.



Rys. 7. Okno dialogowe komponentu **Measured value input (Comp 46)**

Definiowanie wartości wewnątrz wybranego komponentu

Kolejną z metod stosowanych do definiowania danych wejściowych jest wprowadzanie wartości wewnątrz wybranego komponentu. Parametry możliwe do zdefiniowania zależą od rodzaju komponentu i wyboru wariantu przeprowadzania symulacji. Więcej szczegółowych informacji dotyczących tej metody przedstawiono w opracowanych przykładach.

Należy pamiętać, że niektóre parametry i ich wartości można definiować zamiennie, z wykorzystaniem więcej niż jednej opcji, co może prowadzić do błędu obliczeniowego w postaci nadmiaru danych wejściowych. Komunikaty o tego typu błędach są wyświetlane po nieudanej próbie wykonania obliczeń.

2.2. Moduły wspomagajace pracę w programie Ebsilon®Professional

Środowisko Ebsilon®Professional, oprócz samego silnika programu w postaci aplikacji Ebsilon, składa się z szeregu dodatkowych modułów rozszerzających funkcjonalność i wspierających prowadzone prace, które zostaną omówione poniżej.

EbsOptimize – optymalizacja parametrów

EbsOptimize to zintegrowany optymalizator wykorzystujący algorytmy genetyczne, pozwalający na optymalizację wybranej wartości docelowej przez zmianę jednej lub

kilku wskazanych wielkości. Narzędzie to pozwala na skrócenie często żmudnego i czasochłonnego poszukiwania optymalnych parametrów pracy, czyniąc to zajecie bardziej zautomatyzowanym. Główne i najważniejsze cechy modułu to:

- możliwość dowolnego formułowania wartości docelowej i wielkości wpływających na wynik,
- zastosowanie algorytmów genetycznych,
- dostępność modułu jako funkcji modułu EbsScript.

EbsScript – język skryptowy oparty na Pascalu

EbsScript jest w pełni zintegrowanym językiem skryptowym opartym na języku Pascal. Dzięki niemu wszystkie procesy przeprowadzane w programie Ebsilon®Professional mogą zostać zautomatyzowane, a poszczególne komponenty można indywidualnie programować. Narzędzie to pozwala także na uzyskanie pełnego dostępu do wszystkich danych w modelu oraz do zewnętrznych plików, np. MS Excel. Podstawowe funkcje i zadania, jakie może pełnić EbsScript, to:

- edytor z możliwością obsługi przez przeglądarkę,
- kompilator z opcją kontroli składni,
- zintegrowane zarządzanie skryptami,
- programowanie komponentów specyficznych dla użytkownika,
- zastosowanie do automatycznego wykonywania obliczeń dla zdefiniowanych przypadków, optymalizacji itp.

EbsOpen – biblioteka klasy COM

EbsOpen to kompleksowa biblioteka klasy COM, która oferuje dostęp do wszystkich danych aplikacji, modeli i komponentów. Stanowi potężne narzędzie, które umożliwia wykonywanie symulacji, walidację i obliczenia w trybie „co, jeśli", parametryzowanie modeli oraz automatyczne uruchamianie symulacji i nowych obliczeń. Jego cechy to:

- ponad 200 klas i 3500 metod oraz własności,
- możliwość integrowania ze wszystkimi popularnymi systemami automatyki i środowiskami programowania, takimi jak Visual Studio .Net lub środowisko VBA produktów MS Office.

EbsBoiler – dodatkowe komponenty do szczegółowego modelowania technologii i konstrukcji kotłów

EbsBoiler zawiera komponenty do szczegółowego modelowania geometrii kotła i powierzchni wymiany ciepła. Dzięki temu możliwe jest dokładniejsze odwzorowanie pracy danego typu kotła i określenie stopnia zanieczyszczenia poszczególnych powierzchni ogrzewanych.

Główne komponenty zawarte w module EbsBoiler to:

- strefa przepływu spalin,
- strefa reakcji,
- główna powierzchnia ogrzewana,
- pomocnicza powierzchnia ogrzewana.

OEM-GTLib – biblioteka turbin gazowych oparta na danych producenta

Biblioteka OEM-GTLib, opracowana i dystrybuowana we współpracy z firmą Enexsa GmbH (wcześniej VTU Energy GmbH) [2.3], zawiera dużą liczbę modeli turbin gazowych. Są one dostosowane do rzeczywistej wydajności, jaką osiągają turbiny, i bazują na oficjalnych danych dostarczonych przez ich producenta. W bibliotece dostępne są modele turbin gazowych następujących firm: Alstom, Ansaldo Energia, CENTRAX, Capstone, General Electric, Hitachi, Kawasaki, MAN, MHPS, OPRA, Rolls-Royce, Siemens oraz Solar Turbines. Zakres nominalnych mocy elektrycznych dostępnych turbin gazowych zawiera się w przedziale od 30 kW do 570 MW. Komponent turbiny gazowej **Gas turbine (OEM GT)** pozwala na symulację jej pracy z wykorzystaniem charakterystyk w postaci krzywych korekcyjnych dostarczonych przez producenta. W określonych warunkach odniesienia (np. warunki ISO) i z użyciem danych od producenta wyznaczane są następujące parametry:

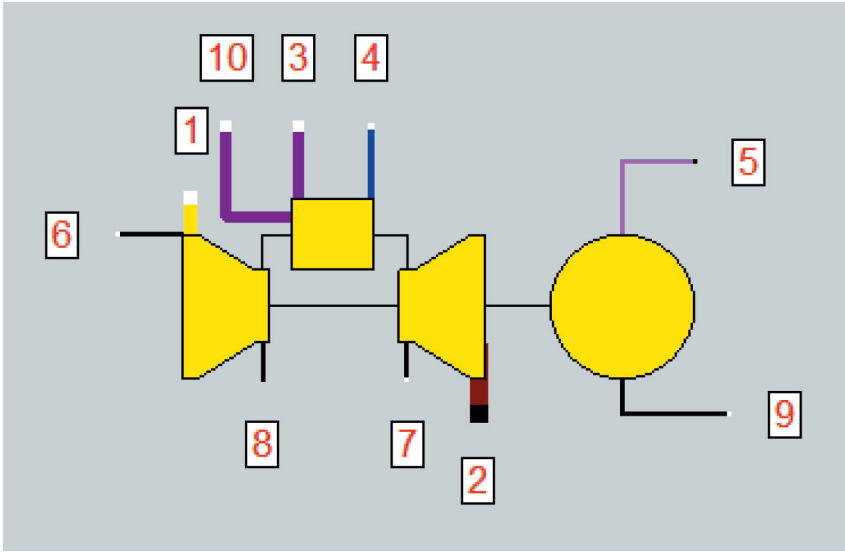
- moc elektryczna (na zaciskach generatora),
- współczynnik jednostkowego zużycia ciepła przez turbinę gazową,
- przepływ masowy i temperatura spalin,
- moc chłodzenia międzystopniowego sprężarki (opcja),
- przepływ masowy wtrysku wody lub pary do komory spalania (opcja).

Odchylenie pomiędzy wartością znamionową w warunkach odniesienia a bieżącym punktem pracy oblicza się z wykorzystaniem współczynników korekcyjnych wyznaczanych dla następujących parametrów:

- temperatura na wlocie do sprężarki,
- wilgotność na wlocie sprężarki,
- ciśnienie otoczenia,
- spadek ciśnienia wlotowego pomiędzy otoczeniem a wlotem do sprężarki,
- spadek ciśnienia wylotowego pomiędzy wylotem z turbiny a otoczeniem,
- wartość opałowa paliwa,
- przepływ wody lub pary wtryskowej do komory spalania,
- częstotliwość sieci,
- wskaźnik obciążenia turbiny gazowej.

Powyższy zestaw parametrów musi zostać zdefiniowany przez wprowadzenie danych wejściowych lub pośrednio przez wykorzystanie odpowiednich linii logicznych (rys. 8):

- linia logiczna nr 6: ciśnienie otoczenia lub wysokość geopotencjalna;
- linia logiczna nr 7: dodatkowe straty ciepła;
- linia logiczna nr 8: połączenie działania chłodnicy międzystopniowej turbiny gazowej z innymi komponentami zawartymi w modelu symulacyjnym (w przypadku gdy nie są dostępne krzywe korekcyjne dla tego parametru, nie bierze ona udziału w obliczeniach);
- linia logiczna nr 9: wymagana moc elektryczna turbiny gazowej lub wskaźnik obciążenia turbiny gazowej.



Rys. 8. Komponent turbiny gazowej z zaznaczonymi przyłączeniami wg biblioteki OEM GT [2.2]

EbsSolar – komponenty do szczegółowego modelowania technologii wykorzystujących kolektory słoneczne

EbsSolar to moduł opracowany we współpracy z Niemiecką Agencją Kosmiczną (DLR), zawierający elementy służące do szczegółowego wymiarowania farm słonecznych. Może być wykorzystywany do badań dotyczących obiektów i technologii, a także wyznaczania rocznej produkcji.

Do przeprowadzania symulacji systemu magazynowania ciepła służą komponenty do modelowania magazynowania pośredniego i bezpośredniego. Modelowanie ma-

gazynowania pośredniego pozwala na obliczanie tymczasowego zmiennego pola temperatur materiału magazynującego. Bezpośrednie magazynowanie pozwalana na modelowanie m.in. dwuzbiornikowego magazynu ciekłych soli (*molten liquid salt*). Biblioteka danych materiałowych EbsSolar zawiera własności typowych płynów wykorzystywanych do magazynowania i przenoszenia energii cieplnej, takich jak olej termalny, płynna sól i woda lub para.

Najważniejsze składniki modułu EbsSolar to:

- kolektor słoneczny (kształt paraboliczny/liniowy typu Fresnela),
- komora dystrybucyjna,
- komora zbiorcza,
- pole heliostatów,
- wieża solarna (odbiornik).

EbsHTML – możliwość eksportu danych z programu Ebsilon do formatu HTML

EbsHTML pozwala na eksport opracowanego modelu (w tym również wyników symulacji) w formacie HTML. Wyniki uzyskane w komponentach oraz wartości na liniach łączących komponenty mogą zostać wyświetlone w dowolnym momencie pracy z plikiem HTML. Na etapie eksportowania danych można wybrać, które wyniki symulacji zostaną wyświetlone w pliku HTML.

Do głównych cech i zalet modułu należą:

- wyświetlanie wyników we wszystkich popularnych przeglądarkach;
- prezentacja wyników dla różnych trybów modelu, w tym także makr;
- możliwość prezentacji i wyświetlania modelu oraz wyników bez konieczności posiadania licencji Ebsilon®Professional.

EbsValidate – walidacja danych zgodnie z normą VDI 2048

Moduł EbsValidate pozwala na skorygowanie częściowo podatnych na błędy wartości mierzonych dla licznych punktów pomiarowych w taki sposób, że wszystkie równania składowe zostaną spełnione. Jednocześnie dzięki zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów minimalizowany jest błąd, a wynikiem jest statystycznie najbardziej prawdopodobny stan pracy. W tym przypadku użycie nadmiarowych danych pomiarowych zwiększa wiarygodność statystyczną wyniku walidacji. Oprócz szybkiej walidacji dostępna jest także walidacja zgodnie z normą VDI 2048. Sprawdzanie poprawności w trybie *off-line* z wykorzystaniem modułu EbsValidate jest odpowiednie dla wspierania testów gwarancyjnych lub odbiorowych oraz wykrywania awarii i wadliwego działania systemu i czujników pomiarowych.

Literatura

[2.1] Steag Energy Services: As versatile as a planning tool can be, www.steag-system technologies.com/de/produkte/ebsilon-professional [dostęp: 25.07.2020].
[2.2] Steag Energy Services: www.ebsilon.com [dostęp: 25.07.2020].
[2.3] Enexsa: EBSILON® Libraries – Key to the analysis of combined heat and power plants, http://www.enexsa.com/en/ebsilonlibraries/ebsilonBibliothek.php [dostęp: 25.07.2020].

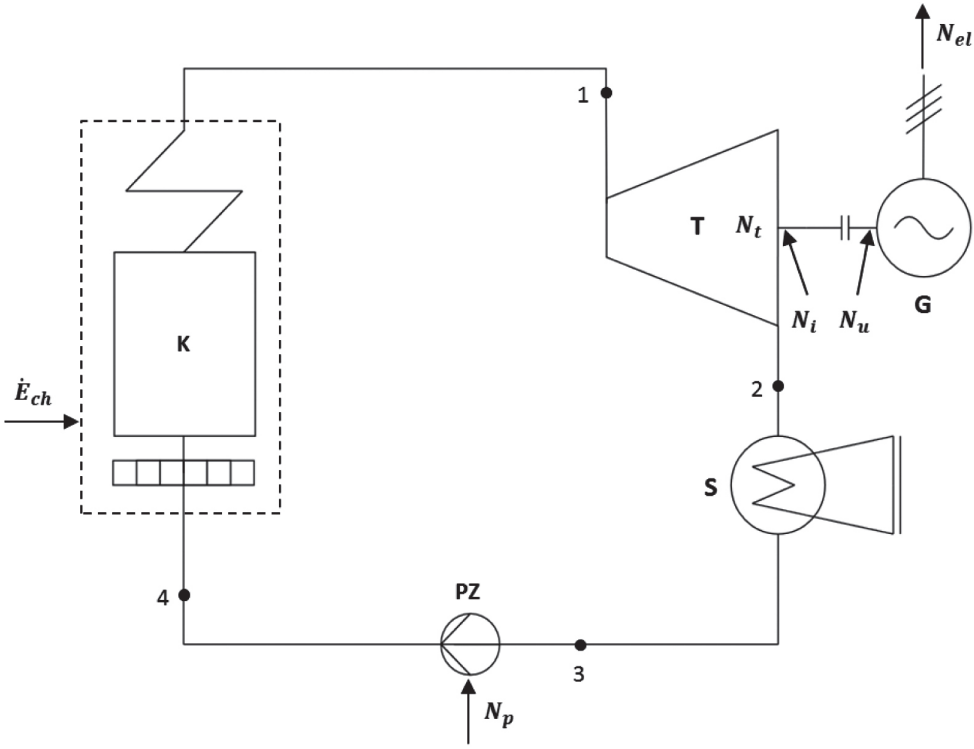
3. Elektrownie i elektrociepłownie parowe

3.1. Wprowadzenie teoretyczne

W konwencjonalnych energetycznych układach parowych (elektrownie i elektrociepłownie) energia elektryczna i ciepło produkowane są z wykorzystaniem obiegu parowo-wodnego [3.1–3.5]. Wyprodukowanie pary z dostarczanej wody następuje dzięki doprowadzeniu odpowiedniej ilości energii cieplnej, uzyskanej głównie na drodze spalania paliw w kotłach energetycznych. Parametry czynnika w obiegu silnie wpływają na ilość produkowanej energii oraz efektywność całego procesu. W podrozdziałach 3.1.1 i 3.1.2 przedstawione zostały podstawowe wiadomości pozwalające scharakteryzować ten proces oraz wyznaczyć jego parametry, w tym również sprawność.

3.1.1. Analiza obiegu siłowni parowej

Podstawowy obieg kondensacyjnej siłowni parowej składa się z połączonych ze sobą następujących elementów: kocioł parowy (K), turbina parowa (T), generator (G), skraplacz (S) oraz pompa wody zasilającej (PZ). Schemat kondensacyjnej siłowni parowej został przedstawiony na rysunku 9. Zasada działania jest następująca. Para przegrzana o ciśnieniu p_1 i temperaturze t_1 zasila turbinę parową (1), gdzie ulega rozprężeniu do ciśnienia p_2. W procesie rozprężania pary w turbinie parowej wytwarzana jest moc wewnętrzna (N_i), która następnie przetwarzana jest na użyteczną moc mechaniczną na wale turbozespołu (N_u) i ostatecznie w połączonym z turbiną generatorze na moc elektryczną (N_{el}). Para na wylocie z turbiny parowej jest parą nasyconą mokrą o stopniu suchości x_2 (2). Następnie para ta jest kierowana do skraplacza, gdzie następuje jej skroplenie i przejście do fazy ciekłej (3). Na kolejnym etapie kondensat ze skraplacza trafia do pompy zasilającej, gdzie następuje wzrost ciśnienia wody z wartości p_3 do wartości p_4. Woda zasilająca doprowadzana jest do kotła (4), gdzie na skutek zamiany energii chemicznej paliwa ($\dot{E}_{ch}$) w użyteczną moc cieplną następuje jej podgrzanie, odparowanie i przegrzanie do parametrów p_1 i t_1. Para przegrzana następnie zasila turbinę parową, zamykając cykl przemian w obiegu.



Rys. 9. Schemat obiegu kondensacyjnej siłowni parowej: G – generator; K – kocioł; PZ – pompa wody zasilającej; S – skraplacz; T – turbina parowa

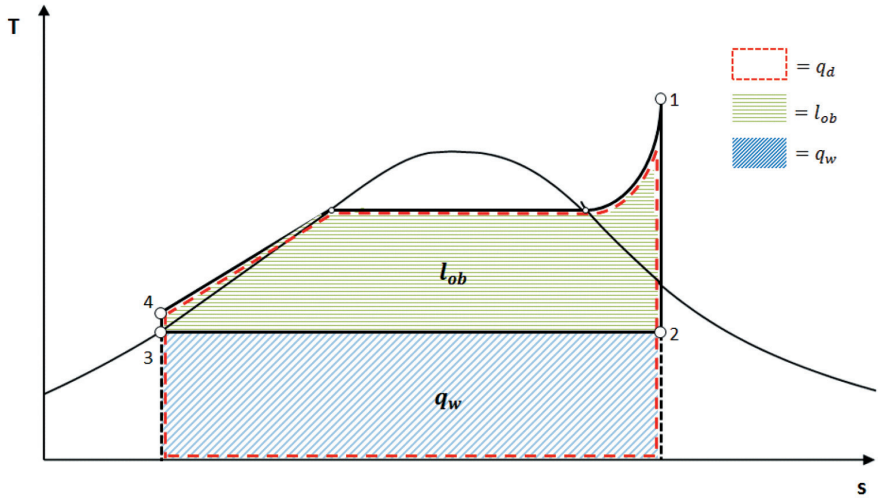
Klasyczny model obiegu Clausiusa–Rankine'a jest obiegiem porównawczym stosowanym w celu określenia jakości przemian termodynamicznych zachodzących w rzeczywistym układzie siłowni parowej [3.6–3.8]. Obieg ten składa się z czterech przemian termodynamicznych czynnika obiegowego, które zachodzą w maszynach oraz urządzeniach układu elektrowni parowej. Obieg porównawczy Clausiusa–Rankine'a został przedstawiony na płaszczyźnie wykresu T-s (temperatura–entropia) na rysunku 10. W klasycznym modelu obiegu porównawczego siłowni parowej możemy wyróżnić następujące przemiany:

- rozprężanie czynnika w turbinie parowej (przemiana izentropowa 1–2),
- skraplanie czynnika w skraplaczu (przemiana izobaryczna 2–3),
- pompowanie wody do kotła (przemiana izentropowa 3–4),
- doprowadzanie ciepła do obiegu (przemiana izobaryczna 4–1).

Na wykresie T-s (rys. 10) ciepło doprowadzone do obiegu Clausiusa–Rankine'a ($\dot{Q}_d$) zaznaczono jako obszar otoczony czerwoną przerywaną linią, natomiast ciepło wyprowadzone z obiegu ($\dot{Q}_w$) jako kreskowane niebieskie pole. Praca obiegu (L_{ob}) jest

zatem różnicą pomiędzy wartością ciepła doprowadzonego do obiegu i wartością ciepła wyprowadzonego z obiegu, co można zapisać wzorem:

$$L_{ob} = \dot{Q}_d - \dot{Q}_w \tag{3.1}$$



Rys. 10. Obieg teoretyczny Clausiusa–Rankine'a w układzie T-s

Przy założeniu, że w analizowanym obiegu masa czynnika obiegowego wynosi 1 kg, możemy wprowadzić parametry jednostkowe dla ciepła i pracy:

– jednostkowa praca turbiny:

$$l_t = \frac{N_t}{\dot{m}} \tag{3.2}$$

– jednostkowa praca pompy:

$$l_p = \frac{N_p}{\dot{m}} \tag{3.3}$$

– jednostkowe ciepło doprowadzone do obiegu:

$$q_d = \frac{\dot{Q}_d}{\dot{m}} \tag{3.4}$$

– jednostkowe ciepło wyprowadzone z obiegu:

$$q_w = \frac{\dot{Q}_w}{\dot{m}} \tag{3.5}$$

– jednostkowa praca obiegu:

$$l_{ob} = l_t - l_p \tag{3.6}$$

Zgodnie z oznaczeniami na rysunku 10 można zapisać zależności:

$$q_d = i_1 - i_4 \tag{3.7}$$

gdzie:

i_1 – entalpia właściwa czynnika obiegowego za kotłem, kJ/kg,

i_4 – entalpia właściwa czynnika obiegowego przed kotłem, kJ/kg

oraz:

$$q_w = i_2 - i_3 \tag{3.8}$$

gdzie:

i_2 – entalpia właściwa czynnika obiegowego za turbiną, kJ/kg,

i_3 – entalpia właściwa czynnika obiegowego za skraplaczem, kJ/kg.

W celu przeprowadzenia oceny termodynamicznej pracy elektrowni parowej wykorzystuje się wskaźnik sprawności termicznej obiegu Clausiusa–Rankine'a, który określony jest następującą formułą:

$$\eta_{tCR}^{(n)} = \frac{l_{ob}}{q_d} = \frac{q_d - q_w}{q_d} = 1 - \frac{q_w}{q_d} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_4} \tag{3.9}$$

gdzie $\eta_{tCR}^{(n)}$ – sprawność termiczna obiegu Clausiusa–Rankine'a netto.

W klasycznym modelu Clausiusa–Rankine'a uwzględniona została praca pompy wody zasilającej (N_p), która w dużym uproszczeniu określa pracę potrzeb własnych siłowni parowej, dlatego wzór (3.9) określa sprawność termiczną obiegu netto. W przypadku, gdy praca pompowania zostanie pominięta, wskaźnik ten wyraża sprawność termiczną obiegu Clausiusa–Rankine'a brutto. Wówczas na wykresie T-s punkt 3 jest równy punktowi 4 i sprawność termiczną obiegu brutto można zapisać następująco:

$$\eta_{tCR}^{(b)} = \frac{l_{ob}}{q'_d} = \frac{q'_d - q_w}{q'_d} = 1 - \frac{q_w}{q'_d} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_3} \tag{3.10}$$

gdzie:

q'_d – jednostkowe ciepło doprowadzone do obiegu uproszczonego, kJ/kg,

$\eta_{tCR}^{(n)}$ – sprawność termiczna obiegu Clausiusa–Rankine'a brutto.

W celu oceny jakościowej pracy kondensacyjnej siłowni parowej wykorzystywany jest wskaźnik sprawności energetycznej bloku brutto lub netto (bez uwzględnienia potrzeb własnych bloku lub z ich uwzględnieniem). Dla siłowni parowej produkującej wyłącznie energię elektryczną wzór na sprawność energetyczną przyjmuje następującą postać:

$$\eta_{ek}^{(b)} = \frac{N_{el}^{(b)}}{\dot{E}_{ch}} = \frac{N_{el}^{(b)}}{\dot{m}_{pal} \cdot W_d} \tag{3.11}$$

gdzie:

N_{el} – moc elektryczna bloku brutto, MW,
$\dot{E}_{ch}$ – strumień energii chemicznej paliwa, MW,
$\dot{m}_{pal}$ – przepływ masowy paliwa do kotła, kg/s,
W_d – wartość opałowa paliwa, MJ/kg.

Wzór (3.11) przedstawia sposób wyznaczania sprawności energetycznej bloku metodą bezpośrednią. Ze względu na trudność z wyznaczaniem bieżących parametrów paliwa węglowego (zużycie, skład i wartość opałowa węgla) metoda ta charakteryzuje się dużym błędem. Możliwe jest również wyznaczenie sprawności energetycznej bloku z wykorzystaniem metody pośredniej.

W obiegu kondensacyjnej siłowni parowej możemy wyróżnić następujące rodzaje strat ciepła (energii) [3.9, 3.10]:

- strata w kotle (s_k),
- strata w rurociągach (s_r),
- strata w skraplaczu (s_s),
- strata mechaniczna (s_m),
- strata w generatorze (s_g).

Miejsce występowania wybranych strat w obiegu siłowni parowej przedstawiono na rysunku 11. Dla znanych wartości poszczególnych wielkości strat w obiegu można wyznaczyć sprawność energetyczną bloku brutto metodą pośrednią:

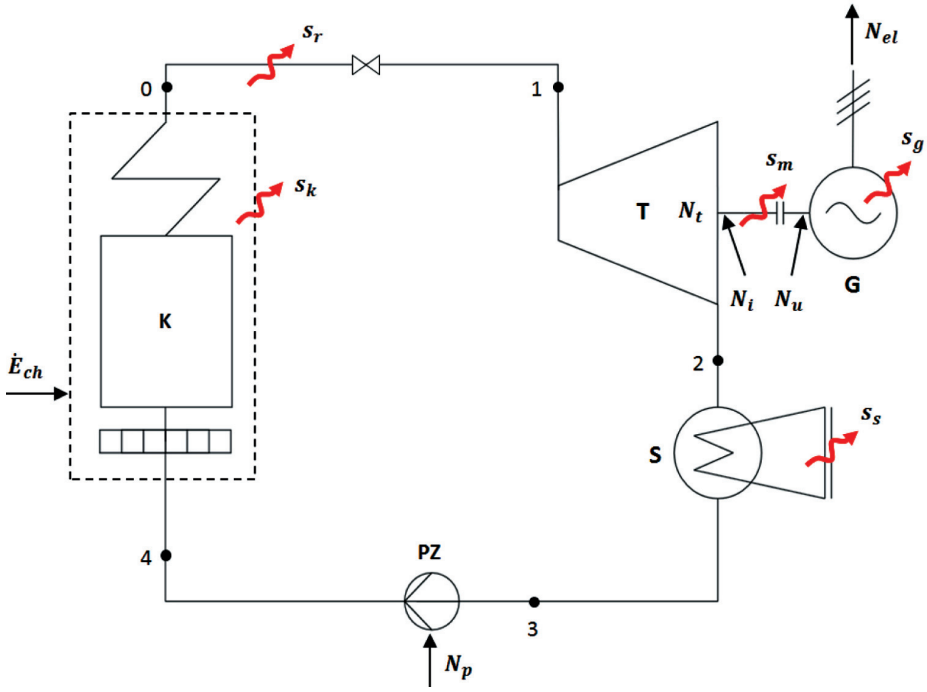
$$\eta_{ek}^{(b)} = 1 - \sum_{i=1}^{n} s_i = 1 - \left(s_k + s_r + s_s + s_m + s_g \right) \tag{3.12}$$

W rzeczywistej siłowni parowej znaczna część energii elektrycznej zużywana jest na pokrycie potrzeb własnych blokowych, które uwzględniają zużycie energii elektrycznej na napęd urządzeń pomocniczych (pompy, wentylatory, młyny węglowe itp.). Powszechnie stosowany jest tzw. wskaźnik potrzeb własnych bloku, który definiowany jest następująco:

$$\varepsilon_{pw} = \frac{N_{pw}}{N_{el}} \tag{3.13}$$

gdzie:

N_{pw} – sumaryczna moc potrzeb własnych bloku, MW,
N_{el} – moc elektryczna bloku brutto, MW.



Rys. 11. Schemat obiegu kondensacyjnej siłowni parowej ze wskazaniem miejsc występowania strat energii

Znając wartość wskaźnika potrzeb własnych bloku lub sumaryczną wartość mocy zużywanej na potrzeby własne blokowe, można określić sprawność energetyczną bloku netto:

$$\eta_{ek}^{(n)} = 1 - \frac{N_{el}^{(n)}}{\dot{E}_{ch}} = 1 - \frac{N_{el}^{(b)} - N_{pw}}{\dot{E}_{ch}} = \eta_{ek}^{(b)} \cdot \left(1 - \varepsilon_{pw}\right) \tag{3.14}$$

Do oceny jakości wytwarzania energii elektrycznej w siłowniach parowych wykorzystywane są również następujące wskaźniki jednostkowego zużycia ciepła do produkcji jednostki mocy elektrycznej:

– brutto:

$$q^{(b)} = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot W_d}{N_{el}^{(b)}} = \frac{1}{\eta_{ek}^{(b)}} \tag{3.15}$$

– netto:

$$q^{(n)} = \frac{\dot{m}_{pal} \cdot W_d}{N_{el}^{(b)} - N_{pw}} = \frac{1}{\eta_{ek}^{(n)}} \tag{3.16}$$

3.1.2. Analiza pracy kotła parowego na paliwo stałe

Do wytworzenia pary przegrzanej w obiegu siłowni parowej niezbędne jest doprowadzenie energii cieplnej do czynnika roboczego. Wytworzenie odpowiedniej wartości energii cieplnej odbywa się przez konwersje energii chemicznej $\dot{E}_{ch}$ w paliwie na energię cieplną, a do tego celu wykorzystuje się kotły energetyczne, nazywane także wytwornicami lub generatorami pary. Kocioł parowy (oznaczony jako K na rysunku 11) jest zasilany wodą, która przepływając przez poszczególne wymienniki w kotle, podgrzewa się, odparowuje, a następnie przegrzewa do odpowiednich parametrów (ciśnienie p_1 i temperatura t_1).

Całkowita sprawność, z jaką energia chemiczna w paliwie zamieniana jest na energię cieplną przekazaną do czynnika roboczego w kotle parowym, może być wyznaczona metodą bezpośrednią:

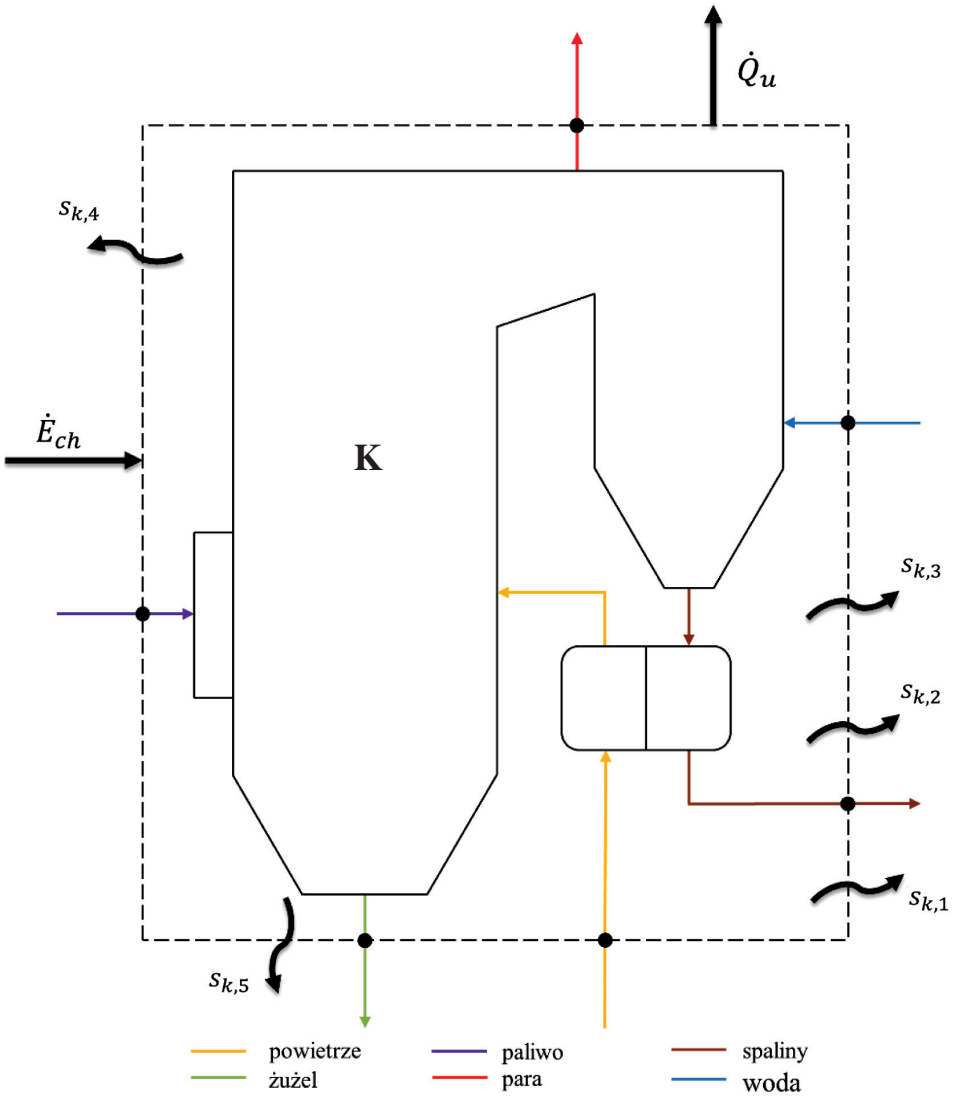
$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_d}{\dot{E}_{ch}} = \frac{\dot{m}(i_1 - i_4)}{\dot{m}_{pal} \cdot W_d} \tag{3.17}$$

gdzie:

η_k – sprawność energetyczna kotła,
$\dot{Q}_d$ – strumień ciepła doprowadzonego do czynnika w obiegu, MW,
$\dot{E}_{ch}$ – strumień energii chemicznej paliwa, MW,
$\dot{m}$ – strumień masowy czynnika roboczego w obiegu, kg/s,
$\dot{m}_{pal}$ – przepływ masowy paliwa do kotła, kg/s,
W_d – wartość opałowa paliwa, MJ/kg,
i_1 – entalpia właściwa czynnika obiegowego za kotłem, kJ/kg,
i_4 – entalpia właściwa czynnika obiegowego przed kotłem, kJ/kg.

Do wyznaczenia dokładnej wartości sprawności z wykorzystaniem wzoru (3.17) konieczna jest znajomość bieżących parametrów paliwa (zużycie, skład i wartość opałowa węgla). Podobnie jak w przypadku wyznaczania sprawności obiegu metoda ta charakteryzuje się dużym błędem, a sprawność kotła może być wyznaczona z wykorzystaniem metody pośredniej (rys. 12):

$$\eta_k = 1 - \sum_{i=1}^{n} s_{k,i} = 1 - \left(s_{k,1} + s_{k,2} + s_{k,3} + s_{k,4} + s_{k,5}\right) \tag{3.18}$$



Rys. 12. Schemat kotła parowego ze wskazaniem miejsc występowania strat energii

W pracy węglowego kotła parowego możemy wyróżnić następujące straty w energii [3.11, 3.12]:

- strata w gazach wylotowych ($s_{k,1}$),
- strata spowodowana obecnością CO w gazach wylotowych ($s_{k,2}$),
- strata wynikająca z obecności części palnych w lotnym popiele i w żużlu ($s_{k,3}$),
- strata promieniowania ($s_{k,4}$),
- strata ciepła jawnego w gorącym żużlu ($s_{k,5}$).

Największa spośród wszystkich strat w kotle to strata wylotowa $s_{k,1}$ wyrażająca straty ciepła zawartego w spalinach przepływających do komina.

Stratę $s_{k,1}$ można wyznaczyć za pomocą wzoru Siegerta:

$$s_{k,1} = k_1 \frac{t_{sp} - t_{pow}}{\mathrm{CO_2} + \mathrm{CO}} \tag{3.19}$$

gdzie:

k_1 – stała zależna od rodzaju paliwa i zawartości CO_2 i CO w spalinach (dla węgla kamiennego $k_1 = 0{,}7$),
t_{sp} – temperatura spalin wylotowych, °C,
t_{pow} – temperatura powietrza (otoczenia), °C,
CO_2 – objętościowy udział dwutlenku węgla w spalinach, %,
CO – objętościowy udział tlenku węgla w spalinach, %.

Udział CO_2 w spalinach może zostać wyznaczony z zależności:

$$\mathrm{CO_2} = \frac{(21 - \mathrm{O_2})\mathrm{CO_{2,max}}}{21} \tag{3.20}$$

gdzie:

O_2 – udział objętościowy tlenu w spalinach,
$CO_{2,max}$ – maksymalna zawartość dwutlenku węgla przy spalaniu danego typu paliwa (węgla kamiennego) bez nadmiaru powietrza.

Strata wylotowa $s_{k,1}$ może zostać wyznaczona także metodą bezpośrednią z następującego równania:

$$s_{k,1} = \frac{V_{sps} \cdot c_{psps}\big|_{t_{pow}}^{t_{sp}} + V_w \cdot c_{pw}\big|_{t_{pow}}^{t_{sp}}}{W_d} \left(t_{sp} - t_{pow}\right) \tag{3.21}$$

gdzie:

V_{sps} – objętość spalin suchych, $m^3_{ss}/kg_{\ paliwa}$,
V_w – objętość pary wodnej, $m^3_{pw}/kg_{\ paliwa}$,
$c_{psps}\big|_{t_{pow}}^{t_{sp}}$ – średnie ciepło właściwe spalin, kJ/(m^3·K),
$c_{pw}\big|_{t_{pow}}^{t_{sp}}$ – średnie ciepło właściwe pary wodnej, kJ/(m^3·K),
W_d – wartość opałowa, kJ/kg,
t_{sp} – temperatura spalin za kotłem, °C,
t_{pow} – temperatura powietrza do kotła, °C.

Objętość spalin suchych V_{sps} może zostać wyznaczona z równania:

$$V_{sps} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \tag{3.22}$$

Udziały objętościowe poszczególnych składników $\left(V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}\right)$ zostały wyznaczone na podstawie składu pierwiastkowego i następujących równań:

$$V_{CO_2} = 1{,}854 \cdot c \tag{3.23}$$

$$V_{SO_2} = 0{,}68 \cdot s \tag{3.24}$$

$$V_{N_2} = 0{,}8 \cdot n + 0{,}79 \cdot \lambda \cdot V_{pt} \tag{3.25}$$

$$V_{O_2} = 0{,}21 \cdot (\lambda - 1) \cdot V_{pt} \tag{3.26}$$

gdzie:

c, s, n – udziały masowe poszczególnych pierwiastków w paliwie (węgiel, siarka, azot),

λ – współczynnik nadmiaru powietrza,

V_{pt} – teoretyczne zapotrzebowanie powietrza, m^3_{pow}/kg_{paliwa}.

Współczynnik nadmiaru powietrza λ może zostać wyznaczony, jeśli znana jest zawartość tlenu w spalinach za kotłem, wg następującej zależności:

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2} \tag{3.27}$$

gdzie O_2 – udział objętościowy tlenu w spalinach.

Objętość pary wodnej V_w można wyznaczyć, korzystając z równania:

$$V_w = V_{H_2O} + 1{,}61 \cdot \lambda \cdot x \cdot V_p^t \tag{3.28}$$

$$V_{H_2O} = 11{,}2 \cdot \left(h + \frac{w}{9}\right) \tag{3.29}$$

$$V_{pt} = 8{,}89 \cdot (c + 0{,}375 \cdot s) + 0{,}265 \cdot h - 0{,}333 \cdot o \tag{3.30}$$

gdzie:

x – stopień zawilżenia powietrza, kg_{pw}/kg_{ps},

w – udział masowy wilgoci w spalanym paliwie,

o, h – udziały masowe poszczególnych pierwiastków w paliwie (tlen, wodór).

Średnie ciepło właściwe spalin $c_{psps}\, I_{t_{pow}}^{t_{sp}}$ w zakresie temperatur od t_{pow} do t_{sp} zostało wyznaczone z wykorzystaniem średniego ciepła właściwego dla poszczególnych składników spalin:

$$c_{psps}\, I_{t_{pow}}^{t_{sp}} = \frac{c_{psps}\,|_0^{t_{sp}}\; t_{sp} - c_{psps}\,|_0^{t_{pow}}\; t_{pow}}{t_{sp} - t_{pow}} \tag{3.31}$$

$$c_{psps}\, I_0^{t_{sp}} = r_{CO_2} c_{pCO_2} I_0^{t_{sp}} + r_{SO_2} c_{pSO_2} I_0^{t_{sp}} + r_{O_2} c_{pO_2} I_0^{t_{sp}} + r_{N_2} c_{pN_2} I_0^{t_{sp}} \tag{3.32}$$

$$c_{psps}\, I_0^{t_{pow}} = r_{CO_2} c_{pCO_2} I_0^{t_{pow}} + r_{SO_2} c_{pSO_2} I_0^{t_{pow}} + r_{O_2} c_{pO_2} I_0^{t_{pow}} + r_{N_2} c_{pN_2} I_0^{t_{pow}} \tag{3.33}$$

gdzie:

$c_{psps}\, I_0^{t_{sp}}$ – ciepło właściwe spalin w zakresie temperatury od 0°C do t_{sp}, kJ/(m^3·K),

$c_{psps}\, I_0^{t_{pow}}$ – ciepło właściwe powietrza w zakresie temperatury od 0°C do t_{pow}, kJ/(m^3·K),

$c_{pCO_2} I_0^{t_{sp}}$, $c_{pSO_2} I_0^{t_{sp}}$, $c_{pO_2} I_0^{t_{sp}}$, $c_{pN_2} I_0^{t_{sp}}$ – ciepło właściwe poszczególnych składników spalin suchych (CO_2, SO_2, O_2, N_2) w zakresie temperatury od 0°C do t_{sp},

$c_{pCO_2} I_0^{t_{pow}}$, $c_{pSO_2} I_0^{t_{pow}}$, $c_{pO_2} I_0^{t_{pow}}$, $c_{pN_2} I_0^{t_{pow}}$ – ciepło właściwe poszczególnych składników spalin suchych (CO_2, SO_2, O_2, N_2) w zakresie temperatury od 0°C do t_{pow},

$r_{CO_2}, r_{SO_2}, r_{O_2}, r_{N_2}$ – udziały objętościowe poszczególnych składników spalin suchych (CO_2, SO_2, O_2, N_2), które można obliczyć, wykorzystując następujące zależności:

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{sps}} \tag{3.34}$$

$$r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{sps}} \tag{3.35}$$

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{sps}} \tag{3.36}$$

$$r_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{V_{sps}} \tag{3.37}$$

Średnie ciepło właściwe pary wodnej $c_{pw}|_{t_{pow}}^{t_{sp}}$ należy wyznaczyć analogicznie jak dla spalin (3.31), uwzględniając wyłącznie ciepło właściwe pary wodnej w zakresie temperatur od 0°C do t_{sp} $c_{pw}|_{t_{pow}}^{t_{sp}}$ oraz od 0°C do t_{pow} $c_{pw}|_{0}^{t_{pow}}$.

$$c_{pw}|_{t_{pow}}^{t_{sp}} = \frac{c_{pw}|_{0}^{t_{sp}}\ t_{sp} - c_{pw}|_{0}^{t_{pow}}\ t_{pow}}{t_{sp} - t_{pow}} \tag{3.38}$$

Wartość opałowa paliwa W_d może zostać wyznaczona metodami laboratoryjnymi lub z wykorzystaniem zależności:

$$W_d = 33900 \cdot c + 144030 \cdot \left(h - \frac{o}{8} \right) + 10400 \cdot s - 2500 \cdot (9 \cdot h + w) \tag{3.39}$$

Strata niezupełnego spalania $s_{k,2}$ spowodowana występowaniem tlenku węgla CO w spalinach może zostać wyznaczona ze wzoru:

$$s_{k,2} = f \frac{CO}{CO + CO_2} \tag{3.40}$$

gdzie dla węgla kamiennego $f = 60$, a CO i CO_2 oznaczają objętościowy udział poszczególnych gazów w spalinach.

Udział CO_2 może zostać wyznaczony ze wzoru (3.20).

Stratę niecałkowitego spalania $s_{k,3}$ w żużlu i lotnym popiele oblicza się ze wzoru (3.41), uwzględniając, że popiół zawarty w paliwie przechodzi w części do żużla, a w części do popiołu:

$$s_{k,3} = s_z + s_l \tag{3.41}$$

Stratę spowodowaną obecnością części palnych w żużlu określa się ze wzoru:

$$s_z = \frac{33790 \cdot z \cdot (0{,}9 \cdot c_z)}{W_d} \tag{3.42}$$

a stratę spowodowaną obecnością części palnych w lotnym popiele można wyznaczyć, korzystając z zależności:

$$s_l = \frac{33790 \cdot l \cdot (0,9 \cdot c_l)}{W_d} \tag{3.43}$$

gdzie:

c_z – udział masowy części palnych w żużlu, %,
c_l – udział masowy części palnych w lotnym popiele, %,
a_l – współczynnik wskazujący, jaka część popiołu zawartego w paliwie przeszła po spaleniu paliwa do spalin w postaci lotnego popiołu, a jaka część pozostała w żużlu.

Masę żużla z i popiołu l powstających z 1 kg paliwa oblicza się z zależności:

$$z = (1 - a_l) \cdot a \tag{3.44}$$

$$l = a_l \cdot a \tag{3.45}$$

gdzie a reprezentuje udział masowy zawartości popiołu w paliwie.

Stratę do otoczenia $s_{k,4}$ uwzględniającą przepływ ciepła od kotła do otoczenia na drodze konwekcji i promieniowania oblicza się ze wzoru empirycznego:

$$s_{k,4} = 10^{(0,36173 - 0,2912 \lg \dot{Q}_u)} \tag{3.46}$$

gdzie $\dot{Q}_u = \dot{Q}_d$ – moc użyteczna kotła MW.

Ostatnia ze strat – $s_{k,5}$ – związana ze stratą ciepła w gorącym żużlu (żużel opada ze ścian do leja, gdzie jest schładzany do temperatury otoczenia) określana jest wzorem:

$$s_{k,5} = \frac{\dot{m}_z \cdot c_z \cdot (t_z - t_{pow})}{\dot{m}_{pal} \cdot W_d} \cdot 100 = \frac{1885 \cdot A \cdot (1 - a_l)}{W_d} \tag{3.47}$$

gdzie:

$\dot{m}_z$ – strumień masy żużla, kg/s,
c_z – ciepło właściwe żużla, kJ/(kg·K),
t_z – temperatura żużla, °C,
t_{pow} – temperatura powietrza (otoczenia), °C,
$\dot{m}_{pal}$ – strumień masy paliwa, kg/s,
W_d – wartość opałowa paliwa, kJ/kg,
A – udział masowy popiołu w paliwie, %,
$(1 - a_l)$ – zawarta w paliwie część popiołu, która przechodzi do żużla.

Znając wszystkie straty, sprawność kotła η_k można wyznaczyć z zastosowaniem następującej formuły:

$$\eta_k = 1 - \sum_{i=1}^{n} s_{k,i} = 1 - \left(s_{k,1} + s_{k,2} + s_{k,3} + s_{k,4} + s_{k,5} \right) \tag{3.48}$$

W przypadku, gdy jest znana moc użyteczna kotła $\dot{Q}_u$ (np. na podstawie wyników modelowania), możliwe staje się wyznaczenie strumienia masowego paliwa dostarczonego do kotła z wykorzystaniem zależności:

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{E}_{ch}} = \frac{\dot{m}(i_1 - i_4)}{\dot{m}_{pal} \cdot W_d} = 1 - \left(s_{k,1} + s_{k,2} + s_{k,3} + s_{k,4} + s_{k,5} \right) \tag{3.49}$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{\dot{Q}_u}{\eta_k \cdot W_d} = \frac{\dot{m}(i_1 - i_4)}{\eta_k \cdot W_d} \tag{3.50}$$

3.2. Ćwiczenia praktyczne

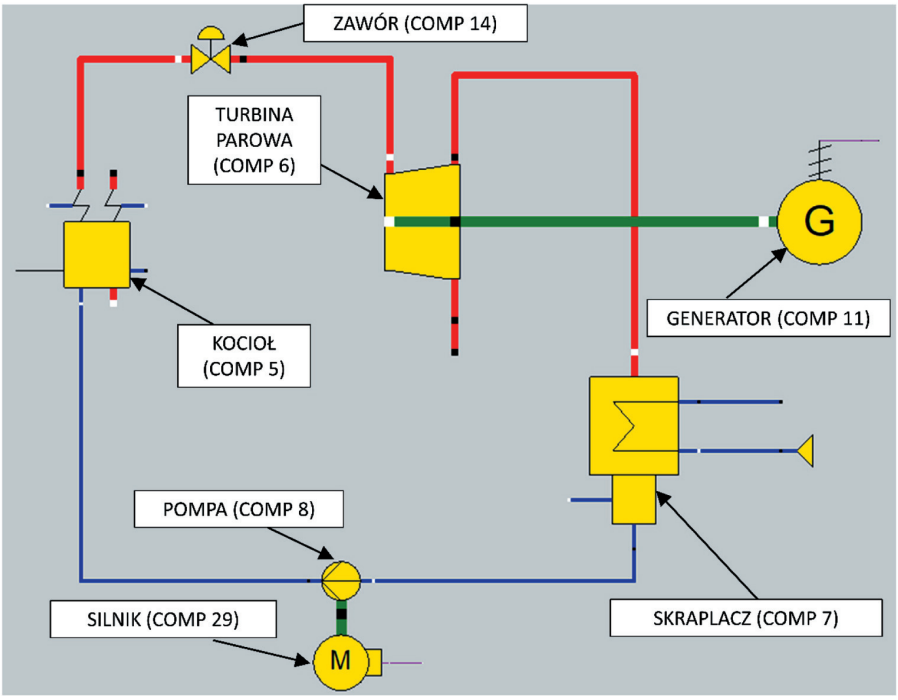
Ćwiczenie 1
Model kondensacyjnej siłowni parowej

Cel ćwiczenia

Zapoznanie ze środowiskiem programu Ebsilon®Professional i opracowanie modelu kondensacyjnej siłowni parowej pozwalającego na wykonanie obliczeń i wyznaczanie podstawowych parametrów obiegu Rankine'a dla zdefiniowanych danych wejściowych.

Opis zadań do wykonania

W celu wykonania ćwiczenia należy przygotować model kondensacyjnej siłowni parowej zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 13. Model powinien zawierać następujące elementy: kocioł, zawór regulacyjny, turbina parowa, skraplacz, pompa, silnik elektryczny oraz generator. Dane wejściowe zebrano w tabeli 2.



Rys. 13. Połączone komponenty tworzące model siłowni kondensacyjnej

Tabela 2

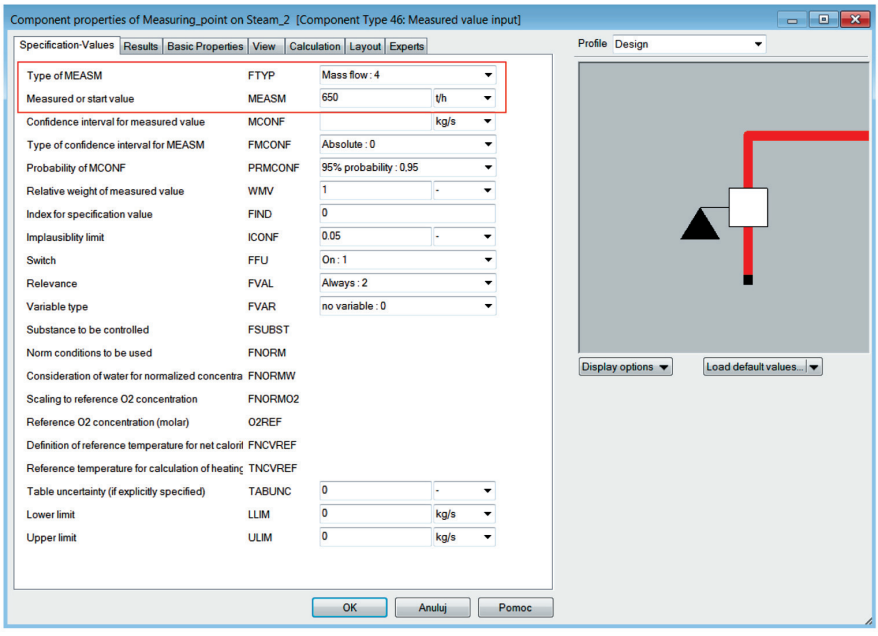
Dane wejściowe do modelu siłowni kondensacyjnej

Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura pary świeżej	535,00[1]	°C	5
Ciśnienie pary świeżej	12,75	MPa	5
Ciśnienie pary świeżej za zaworem regulacyjnym	12,40	MPa	6
Przepływ pary świeżej	650,00	t/h	–
Ciśnienie w skraplaczu	4,20	kPa	46
Spiętrzenie temperatury w skraplaczu	3,50	K	7
Sprawność izentropowa turbiny	88,00	%	6
Sprawność mechaniczna turbiny	99,80	%	6
Sprawność generatora	98,00	%	11

[1] W programie Ebsilon w liczbach ułamkowych stosowane są kropki (zgodnie z zasadami pisowni języka angielskiego).

Instrukcja wykonania modelu

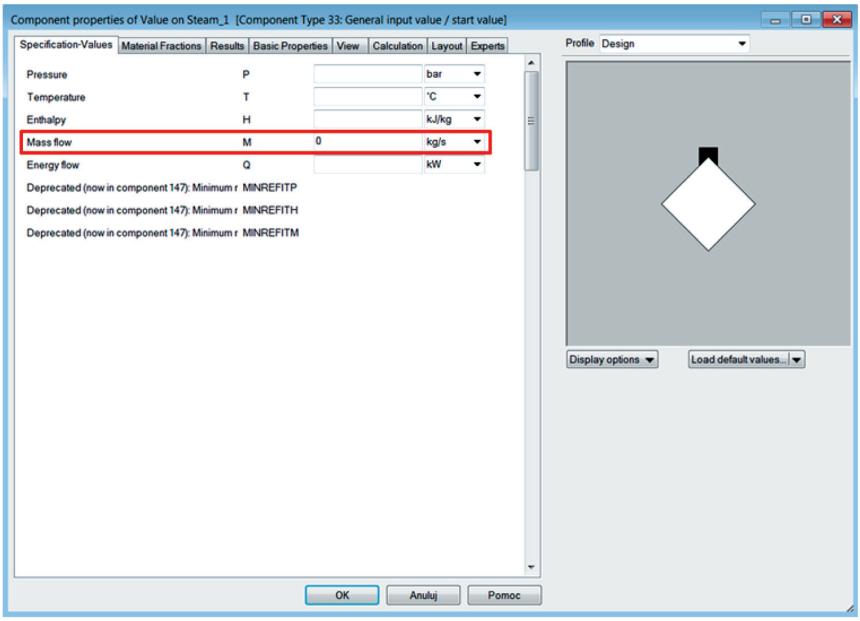
1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, zapisać plik jako *Silownia_Parowa_model.ebs*.
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy następujące komponenty:
   – kocioł (**Steam generator** – **Comp 5**),
   – zawór regulacyjny (**Control valve – Comp 14**),
   – turbina (**Steam turbine – Comp 6**),
   – skraplacz (**Condenser – Comp 7**),
   – pompa (**Pump – Comp 8**),
   – silnik elektryczny (**Motor – Comp 29**),
   – generator (**Generator – Comp 11**).
3. Połączyć w odpowiedniej kolejności wybrane komponenty, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 13.
4. Uzupełnić model o elementy pozwalające na wprowadzanie danych wejściowych:
   a) Komponent **Measuring point** (**Comp 46**) umieścić na linii pary wylotowej z kotła. Wewnątrz komponentu, w polu *Type of MEASM (FTYP)* wybrać opcję *Mass flow : 4*, a następnie w polu *Measured or start value (MEASM)* wprowadzić wartość 650 t/h (rys. 14).



Rys. 14. Komponent 46 uzupełniony o dane wejściowe do obliczeń

b) Wykorzystując komponent **Measuring point** (**Comp 46**), ustawić wartość ciśnienia wylotowego z turbiny na linii *Steam outlet*. Wprowadzić wartość ciśnienia równą 4,2 kPa.

c) Dodatkowo na linii *Extraction 1* z turbiny parowej umieścić komponent **General input value / start value** (**Comp 33**). W polu *Mass flow* wprowadzić wartość 0,0 kg/s (rys. 15).



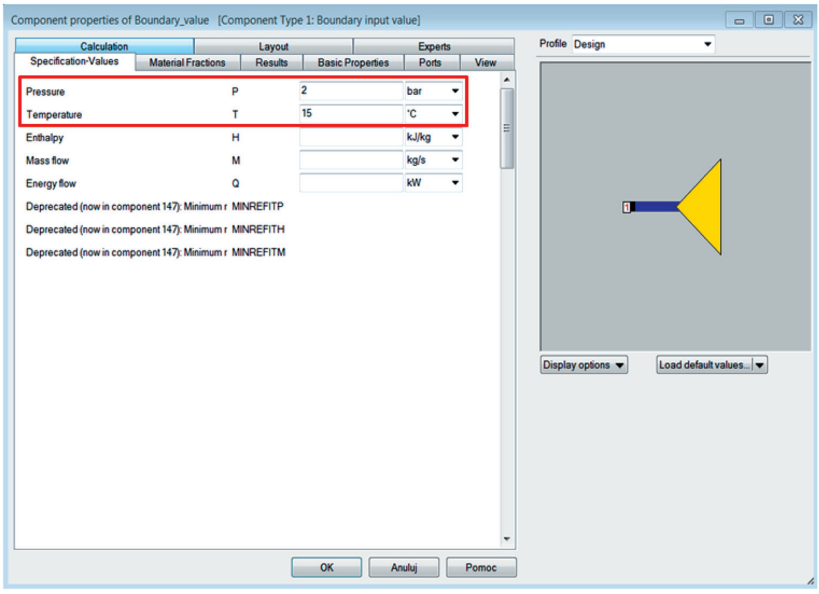
Rys. 15. Komponent 33 uzupełniony o dane wejściowe do obliczeń

d) W celu wprowadzenia danych wejściowych dotyczących parametrów wody chłodzącej na wlocie do skraplacza wybrać komponent **Boundary value** (**Comp 1**) i połączyć go z linią *Cooling medium inlet* w komponencie skraplacza. Wprowadzić w pole *Pressure* wartość 2,0 bar, natomiast w pole *Temperature* wartość 15,0°C (rys. 16).

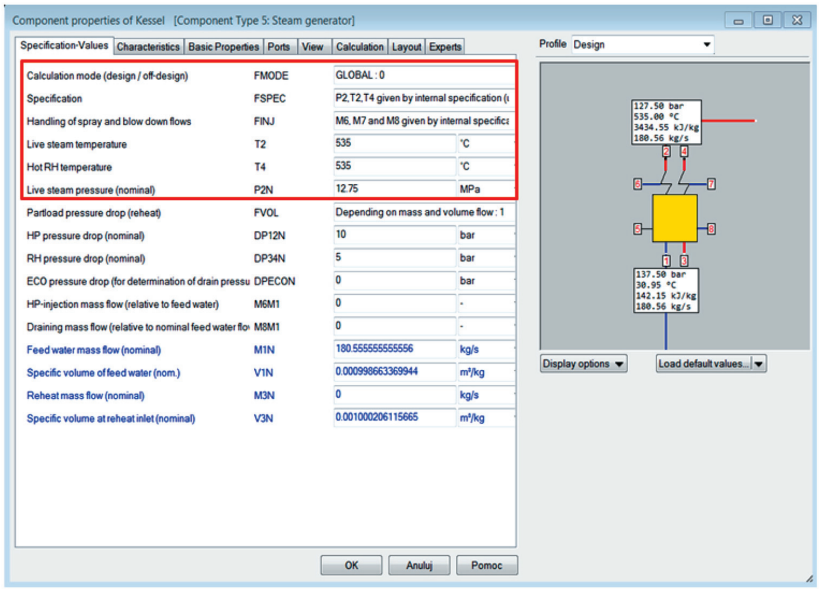
e) Uzupełnić model o wartości temperatury (*Live steam temperature*) i ciśnienia pary świeżej (*Live steam pressure*) w komponencie kotła (rys. 17) zgodnie z danymi przedstawionymi w tabeli 2. Dodatkowo należy upewnić się, że w polu *Specification* oraz *Handling of spray and blow down flows* aktywne są opcje określone indeksem 0.

5. Pozostałe dane wejściowe do modelu należy zdefiniować, wykorzystując komponenty oraz sposoby przedstawione w punkcie 4, zgodnie z zestawieniem w tabeli 2. W ostatniej kolumnie tabeli znajdują się nazwy komponentów, w których należy wprowadzić wskazane wartości. Na rysunku 18 przedstawiono model z uwzględnieniem elementów pozwalających na wprowadzanie i zmianę danych wejściowych.

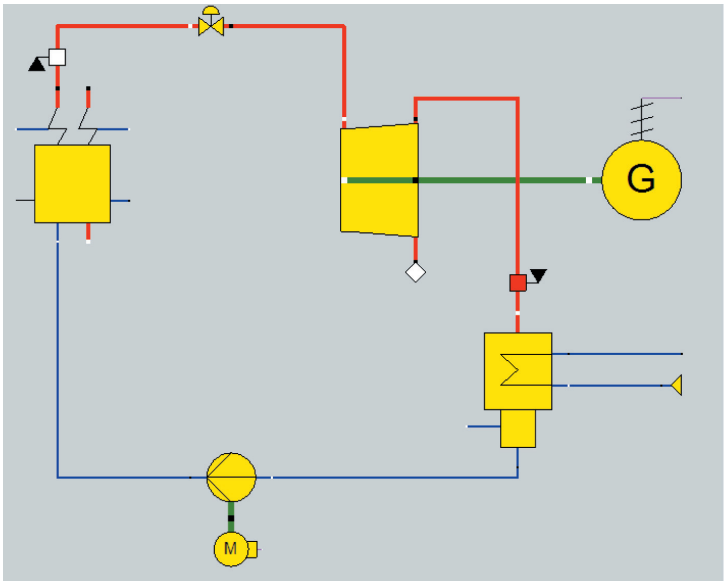
6. W komponencie turbiny należy określić sposób przeprowadzania obliczeń – w polu *Inlet pressure handling* wybrać opcję *P1 calculated from P1NSET (by Stodola equation) : 0* (rys. 19). Dodatkowo w polu *Inlet pressure (nominal)* należy wprowadzić wartość ciśnienia pary świeżej za zaworem regulacyjnym do turbiny zgodnie z tabelą 2.



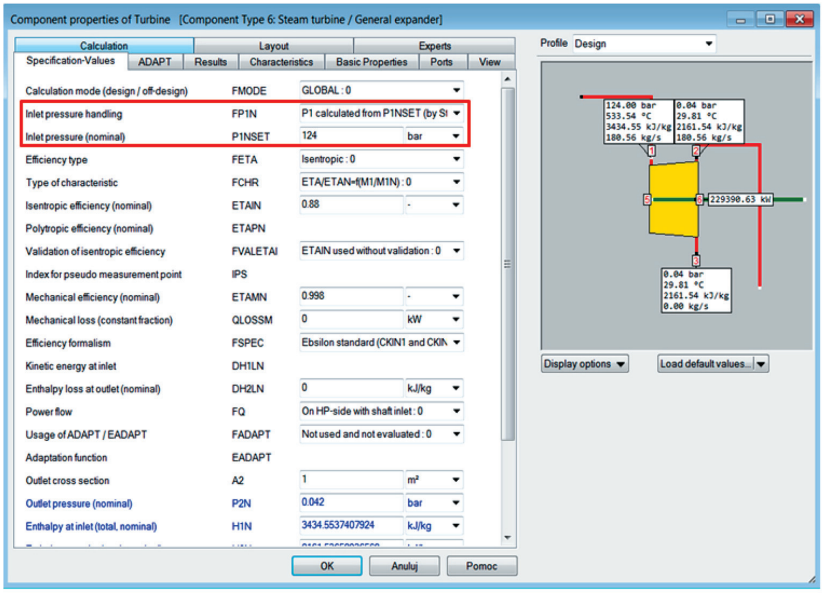
Rys. 16. Komponent 1 uzupełniony o dane wejściowe do obliczeń



Rys. 17. Komponent 5 uzupełniony o dane wejściowe do obliczeń

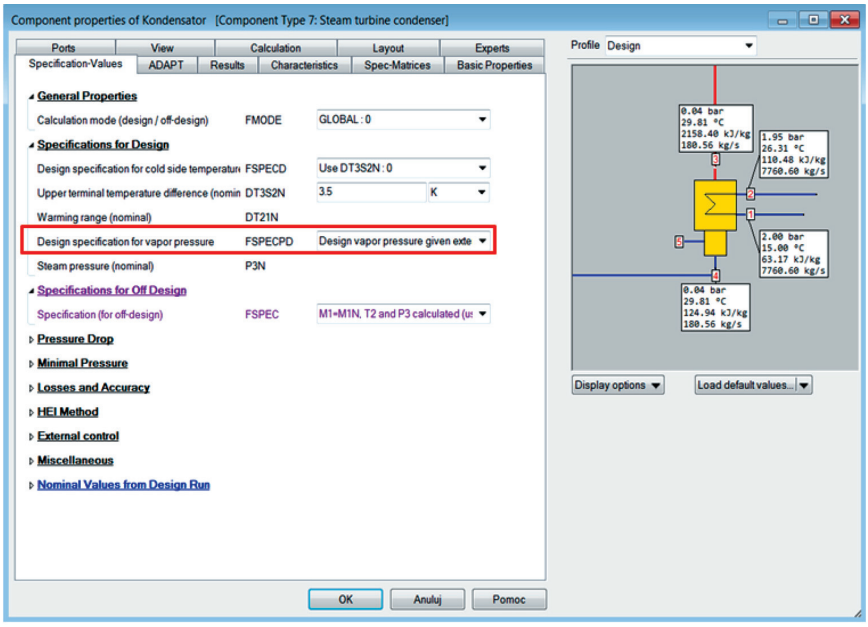


Rys. 18. Model uzupełniony o komponenty pozwalające na definiowanie danych wejściowych



Rys. 19. Komponent turbiny – wybór opcji przeprowadzania obliczeń

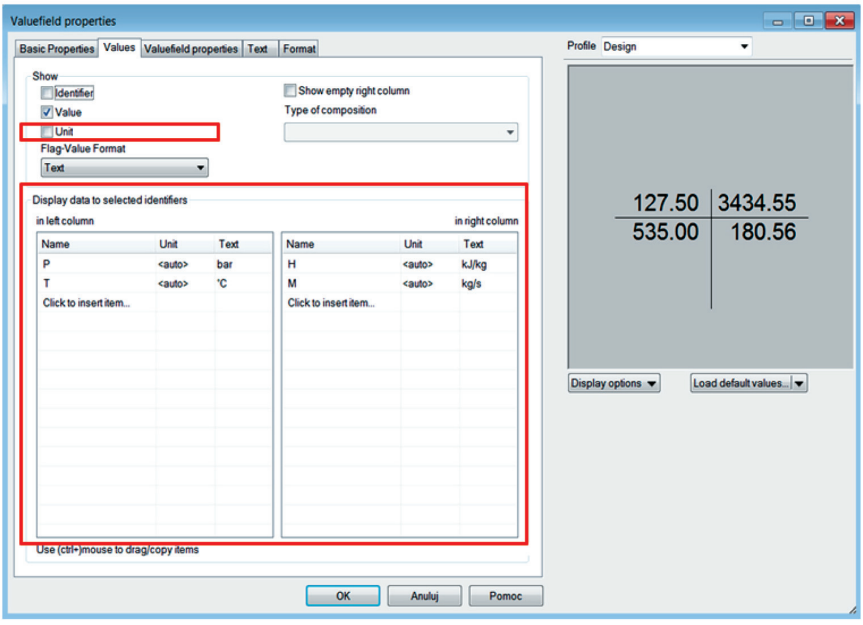
7. W komponencie skraplacza w polu *Design specification for vapor pressure* wybrać opcję *Design vapor pressure given externally (in off-design as start value) : –1* zgodnie z opisem na rysunku 20.



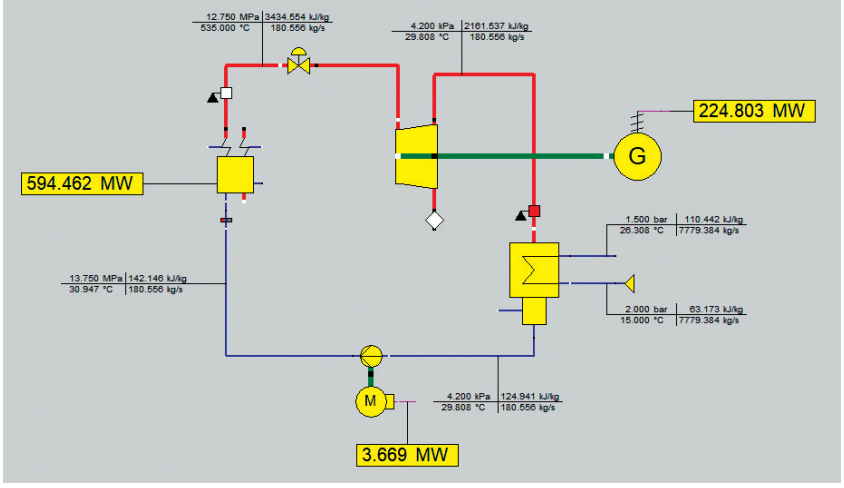
Rys. 20. Komponent skraplacza – wybór opcji przeprowadzania obliczeń

8. Zapisać plik z opracowanym modelem (*Silownia_Parowa_model.ebs*).
9. Uzupełnić model o elementy pozwalające na wizualizację i prezentację wybranych parametrów w charakterystycznych punktach obiegu modelu. W tym celu wybrać opcję *Insert value-cross* z paska narzędzi i następnie wskazać linię, dla której zostaną wyświetlone wartości parametrów. Domyślnie wyświetlane są wartości ciśnienia, temperatury, entalpi właściwej oraz przepływu masowego. Zmiany zakresu prezentowanych parametrów można dokonać, klikając dwukrotnie na tabelę z danymi, następnie należy przejść do zakładki *Values*. W obszarze zaznaczonym na rysunku 21 możliwe jest dodawanie nowych lub zmienianie zakresu obecnych parametrów danej linii, które prezentowane są w modelu. Parametry można wybierać z listy, która rozwija się po kliknięciu w kolumnie *Name*. Dodatkowo można wybrać jednostkę, jaka powinna być wyświetlana dla danego parametru, rozwijając listę w kolumnie *Unit*, a także należy uaktywnić opcję *Unit* w obszarze *Show*. Wykorzystując opcję *Insert value-cross*, należy zaznaczyć parametry temperatury, ciśnienia, entalpii właściwej oraz przepływu masowego w charakterystycznych punktach obiegu, zgodnie ze schematem na rysunku 22 (uwaga: wartości wyświetlą się dopiero po przeprowadzeniu pierwszych obliczeń – patrz punkt 10). Wyświetlić wartości parametrów wraz z odpowiednimi jednostkami (np. MPa, kJ/kg, °C, kg/s).
10. Przeprowadzić obliczenia, uruchamiając symulację przyciskiem *Simulation* lub klawiszem F9 oraz zweryfikować uzyskane wyniki z wartościami przedstawionymi na rysunku 22. Dla analizowanego przypadku pojawi się komunikat informujący o nadmiarze informacji o przepływie masowym w obiegu – *Overdetermination in*

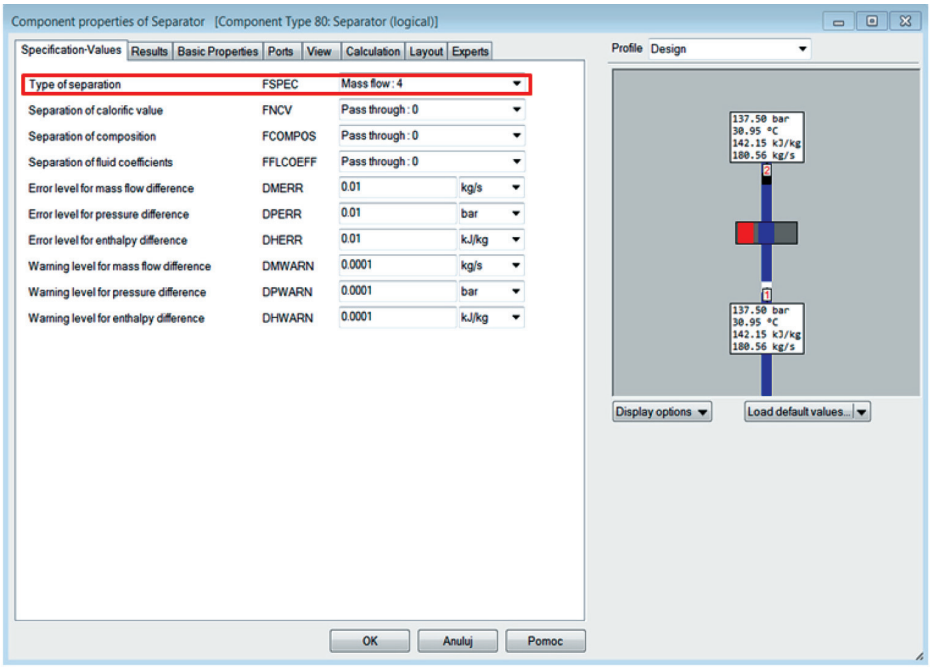
mass flow. W celu eliminacji tego błędu należy wprowadzić do modelu dodatkowy komponent **Separator (logical) – Comp 80** i umieścić go na linii wody zasilającej przed komponentem kotła (rys. 22). Wewnątrz komponentu separatora należy wybrać w polu *Type of separation (FSPEC)* opcję *Mass flow : 4* (rys. 23). Szczegóły dotyczące pojawiających się błędów w modelu można sprawdzić, wybierając na pasku narzędzi zakładkę *Calculations*, a następnie *Error Analysis*.



Rys. 21. Opcja *Insert value-cross* – definiowanie prezentacji wyników

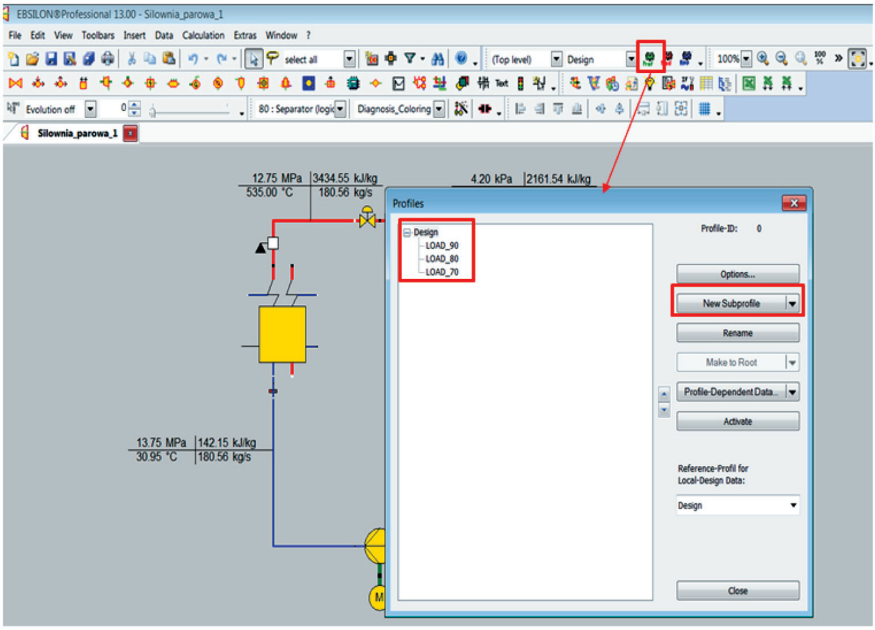


Rys. 22. Model obiegu siłowni kondensacyjnej z wynikami obliczeń



Rys. 23. Komponent 80 – wybór opcji separacji logicznej

11. Zapisać plik z modelem i wynikami obliczeń (*Silownia_Parowa_wyniki.ebs*).
12. Wyświetlić moc na zaciskach generatora, moc pompy oraz użyteczną moc cieplną kotła z wykorzystaniem opcji *Insert Value-Cross*.
    UWAGA: w celu wprowadzenia na daną linię znacznika *Insert Value-Cross* konieczne jest jej przedłużenie. W programie moc oznaczona jest literą *Q*. Dodatkowo w zakładce *Valuefield properties* należy wybrać żółte tło – zaznaczyć opcję *Fill* i następnie wybrać kolor. Porównać uzyskane rezultaty z wynikami przedstawionymi na rysunku 22.
13. Utworzyć nowe profile obliczeniowe do przeprowadzenia symulacji pracy siłowni kondensacyjnej w trybie *off-design*, który reprezentuje pracę układu w warunkach obciążenia innego niż znamionowe. W tym celu na pasku narzędzi należy wybrać opcję *Edit profiles*, następnie *New subprofile* i po dwukrotnym kliknięciu na nowo utworzony profil zmienić jego nazwę na *LOAD_90* (rys. 24). Czynności te powtórzyć i utworzyć dodatkowe dwa profile *LOAD_80* i *LOAD_70*. W profilach *off-desing* należy zdefiniować ilość przepływającej pary na poziomie 90% (*LOAD_90*), 80% (*LOAD_80*) i 70% (*LOAD_70*) nominalnej wydajności kotła równej 650 t/h. Wartość przepływu pary świeżej wprowadzić w komponencie 46 na linii pary świeżej z kotła (patrz pkt 4a).

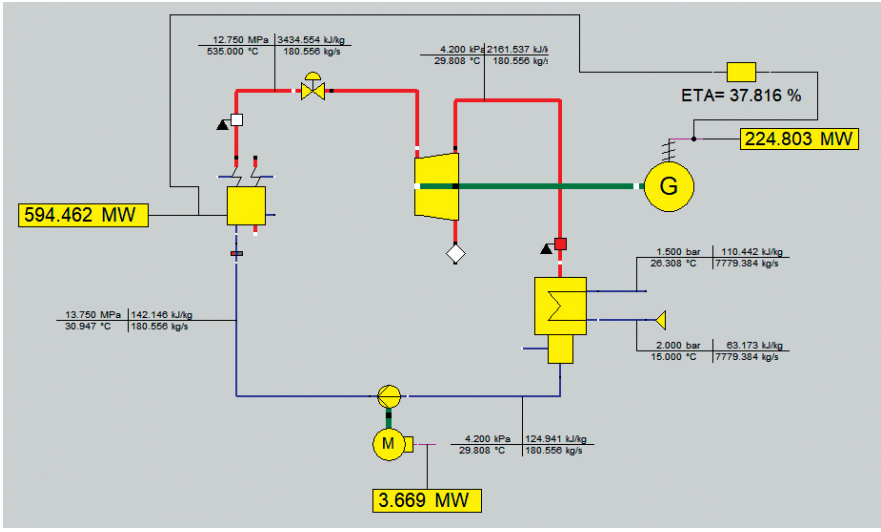


Rys. 24. Okno definicji profili dla trybu *off-design*

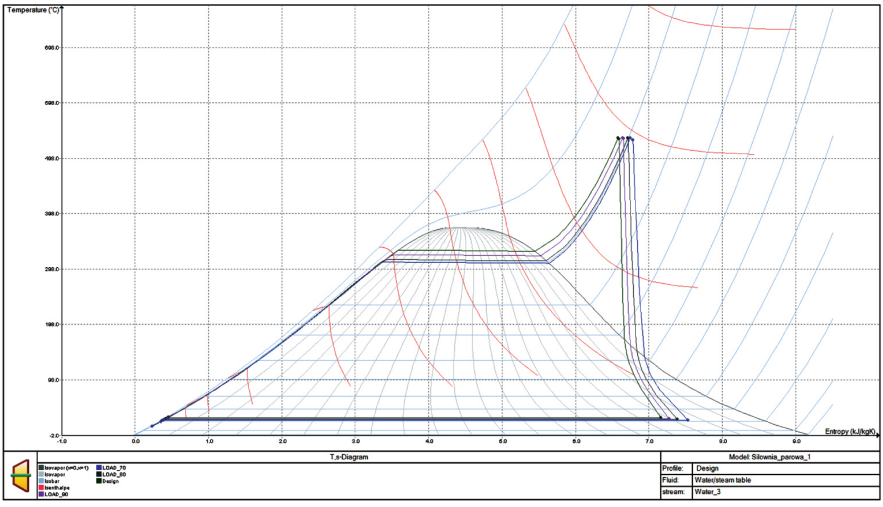
14. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych (*Design, LOAD_90, LOAD_80* oraz *LOAD_70*), a wyniki dla poszczególnych wariantów eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml (File → Export → EBShtml)*.
15. Zapisać końcową wersję pliku (*Silownia_Parowa_wyniki.ebs).*

Zadanie dodatkowe

1. Obliczyć sprawność energetyczną obiegu dla wszystkich analizowanych profili pracy siłowni kondensacyjnej. Do tego celu należy wykorzystać komponent **Cycle efficiency meter** (**Comp 32**), umieścić go w profilu *Design* i odpowiednio skonfigurować. Należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiedni sposób połączenia portów tego komponentu – port 1 *Useful power* połączyć z linią mocy elektrycznej z generatora, natomiast port 2 *Expenditure (Sensible heat)* połączyć z linią logiczną zawierającą moc użyteczną przekazywaną w kotle. W pozostałych profilach *off-desing* komponent ten zostanie automatycznie wprowadzony. W komponencie 32 wybrać jako jednostkę sprawności procent. Porównać rezultaty z wynikami przedstawionymi na rysunku 25. Wyniki eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml*.
2. Przedstawić wyniki na wykresie temperatura–entropia (rys. 26). W tym celu należy wybrać na pasku narzędzi zakładkę *Extras*, następnie *Diagrams* oraz *T, s Diagram* i opcję *Complete*. W polu *Profiles* zaznaczyć wszystkie utworzone profile obliczeniowe.
3. Wyniki eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml.* Zapisać plik pod nazwą *Silownia_Parowa_zadanie_dodatkowe.ebs*.



Rys. 25. Model obiegu siłowni kondensacyjnej z komponentem 32 (tryb *Design*)



Rys. 26. Wykres w układzie T-s dla analizowanej siłowni parowej

Podsumowanie

Realizacja zadania miała na celu zapoznanie użytkownika ze środowiskiem programu Ebsilon®Professional i opracowanie pierwszego modelu symulacyjnego kondensacyjnej siłowni parowej. Użytkownik ma opanowany sposób identyfikacji komponentów, ich prawidłowe łączenie, budowanie pełnej struktury modelu symulacyjnego oraz wprowadzanie danych wejściowych wraz z graficzną prezentacją wybranych wyników obliczeń.

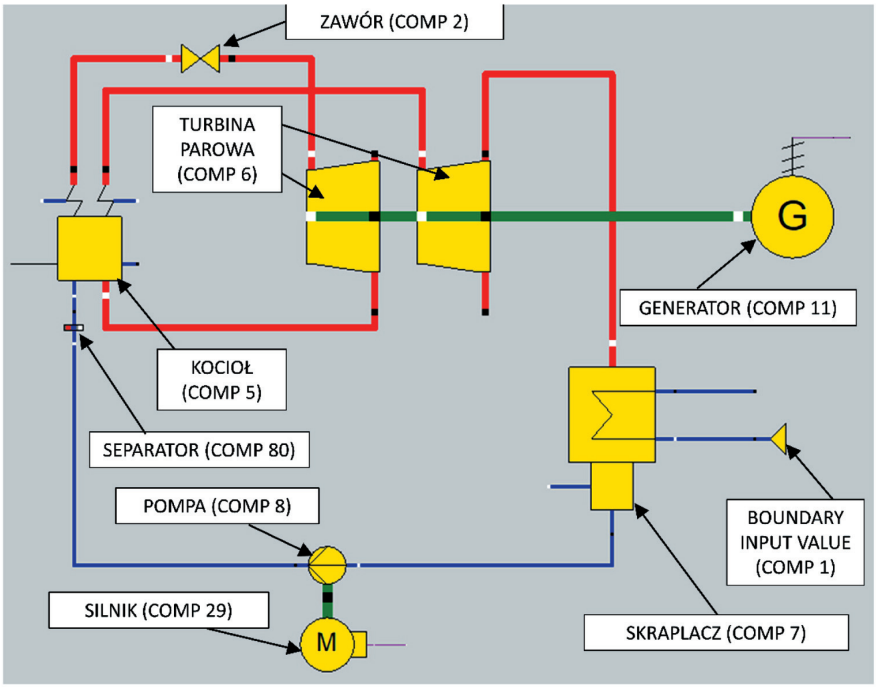
Ćwiczenie 2
Model kondensacyjnej siłowni parowej z przegrzewem wtórnym

Cel ćwiczenia

Modyfikacja modelu kondensacyjnej siłowni parowej o układ przegrzewu wtórnego. Zapoznanie użytkownika z możliwością wykonania obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem modułu Microsoft Excel Add-in for Ebsilon. Przeprowadzenie analizy wpływu zmiany wartości parametru ciśnienia międzystopniowego obiegu na sprawność obiegu i określenie jego optymalnej wartości.

Opis zadań do wykonania

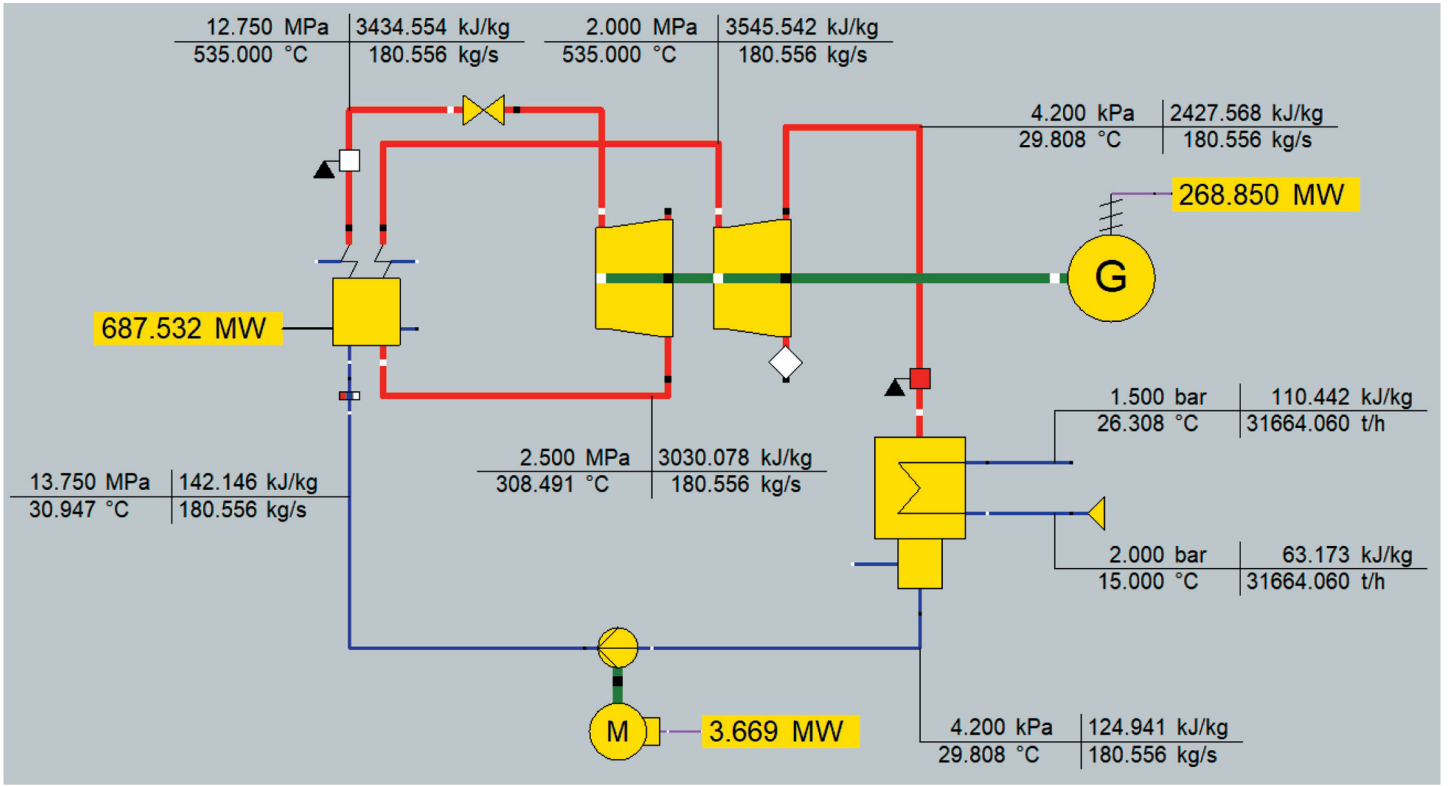
Aby osiągnąć cel ćwiczenia, należy opracować model kondensacyjnej siłowni parowej z układem przegrzewu międzystopniowego. Można do tego wykorzystać model przygotowany w ćwiczeniu 1 (rozdz. 3) (*Silownia_Parowa_model.ebs*). Do modelu należy wprowadzić dodatkowy komponent turbiny (**Steam turbine – Comp 6**), a zawór regulacyjny zastąpić komponentem symulującym pracę zaworu dławiącego (**Throttle – Comp 2**). Struktura układu komponentów w modelu siłowni parowej z układem przegrzewu wtórnego przedstawiona została na rysunku 27.



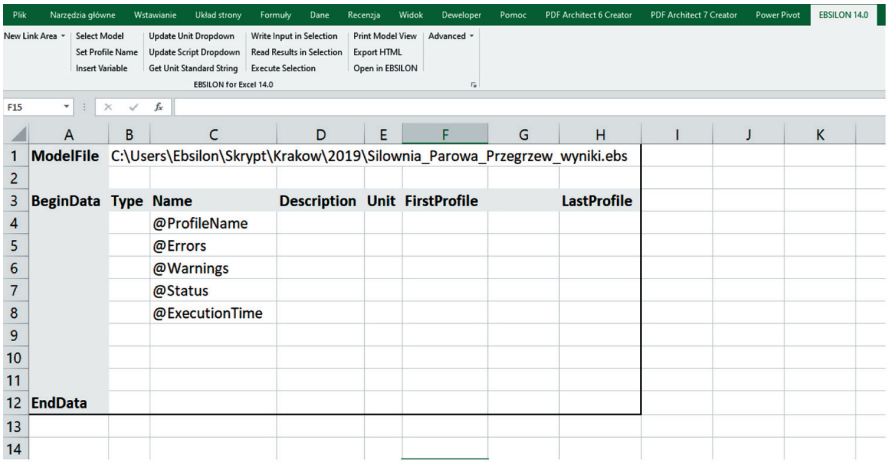
Rys. 27. Struktura połączeń modelu siłowni parowej z przegrzewem wtórnym

Instrukcja wykonania modelu

1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, uruchomić plik *Silownia_Parowa_model.ebs*.
2. Zastąpić zawór regulacyjny (**Control valve – Comp 14**) komponentem reprezentującym zawór dławiący (**Throttle – Comp 2**) oraz dodać dodatkowy stopień turbiny (**Turbine – Comp 6**). Połączyć w odpowiedniej kolejności wybrane komponenty, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 27.
3. Wprowadzić następujące dane wejściowe i opcje obliczeniowe:
   a) w komponencie **Throttle** (**Comp 2**):
      – w polu *Method for pressure drop calculation (FDP)* wybrać opcję *Use specification value DP12RN : 0*,
      – w polu *Pressure drop handling (FDP12RN)* wskazać *Relative : pressure drop=DP12RN*off-design factor : 2*,
      – wprowadzić względny spadek ciśnienia równy 3,0% w obszarze *Pressure drop (nominal) [abs. or rel. to P1] (DP12RN)*,
   b) w dotychczasowym komponencie **Turbine** (**Comp 6**) w polu *Inlet pressure handling* wybrać opcję *P1 given from outside : 1*,
   c) w nowym komponencie **Turbine** (**Comp 6**):
      – w polu *Inlet pressure handling* wybrać opcję *P1 calculated from P1NSET (by Stodola equation) : 0*,
      – w polu *Inlet pressure (nominal) (P1NSET)* wprowadzić wartość ciśnienia równą 20,0 bar.
4. Zapisać model jako *Silownia_Parowa_Przegrzew_model.ebs*.
5. Dla pozostałych komponentów w układzie obowiązuje ten sam zestaw danych wejściowych oraz ustawień obliczeniowych jak w modelu z ćwiczenia 1 (rozdz. 3). Przeprowadzić obliczenia oraz zweryfikować uzyskane wyniki z wartościami przedstawionymi na rysunku 28.
6. Zapisać plik *Silownia_Parowa_Przegrzew_wyniki.ebs.*
7. W tym samym katalogu, gdzie znajduje się model *Silownia_Parowa_Przegrzew_wyniki.ebs*, utworzyć plik MS Excel, zapisać pod nazwą *Cwiczenie_2_przegrzew* i uruchomić arkusz kalkulacyjny. Upewnić się, że dodatek Ebsilon for Excel Add-in został zainstalowany i jest dostępny na pasku narzędzi w programie MS Excel. W przypadku konieczności instalacji tego dodatku należy postępować zgodnie z instrukcją, która dostarczona została wraz z programem.
8. W pliku MS Excel przejść na pasku narzędzi do zakładki *EBSILON 14.0* (nazwa może się różnić w zależności od posiadanej wersji programu). Na arkuszu kalkulacyjnym wybrać komórkę A1, następnie na pasku narzędzi nacisnąć na opcję *New Link Area* i *Profiles in Columns*. Na pasku narzędzi wybrać opcję *Select Model* i wskazać lokalizację pliku *Silownia_Parowa_Przegrzew_wyniki.ebs*. Na rysunku 29 przedstawiony został widok arkusza kalkulacyjnego po wykonaniu dotychczasowych czynności.

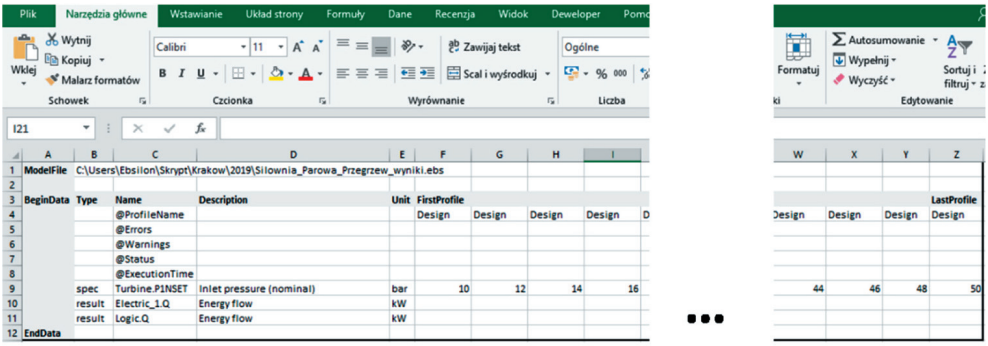


Rys. 28. Model obiegu siłowni parowej z przegrzewem wtórnym wraz z wynikami obliczeń



Rys. 29. Okno konfiguracji arkusza kalkulacyjnego MS Excel z programem Ebsilon

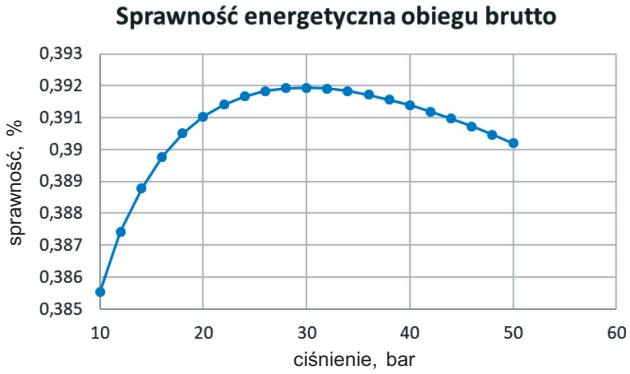
9. W programie Ebsilon, w komponencie 3 nacisnąć prawym przyciskiem myszy na opcję *Inlet pressure (nominal) (P1NSET)* i wybrać *Copy variable definition*. W arkuszu kalkulacyjnym wskazać komórkę C9 i na pasku narzędzi wybrać *Insert Variable***.** Ponownie przejść do programu Ebsilon, dwukrotnie kliknąć na linię elektryczną wychodzącą z generatora, wybrać zakładkę *Stream Values* i przenieść zmienną *Energy flow (Q)* do arkusza kalkulacyjnego do komórki C10. W sposób analogiczny należy wprowadzić do arkusza kalkulacyjnego wartość mocy użytecznej przekazywanej w kotle (komponent 1) – zmienną umieścić w komórce C11. W arkuszu kalkulacyjnym wstawić dodatkowe kolumny, tak aby komórka z opisem *LastProfile* zawierała się w kolumnie Z. Wstawić tekst *Design* w komórkach od F4 do Z4, który oznacza, że obliczenia będą przeprowadzane w profilu *Design* w programie Ebsilon (rys. 30).



Rys. 30. Wygląd okna konfiguracyjnego arkusza
po wprowadzeniu wszystkich danych wejściowych

10. Jednym z celów ćwiczenia jest wyznaczenie wartości optymalnego ciśnienia międzystopniowego, dla którego opracowana struktura kondensacyjnej siłowni paro-

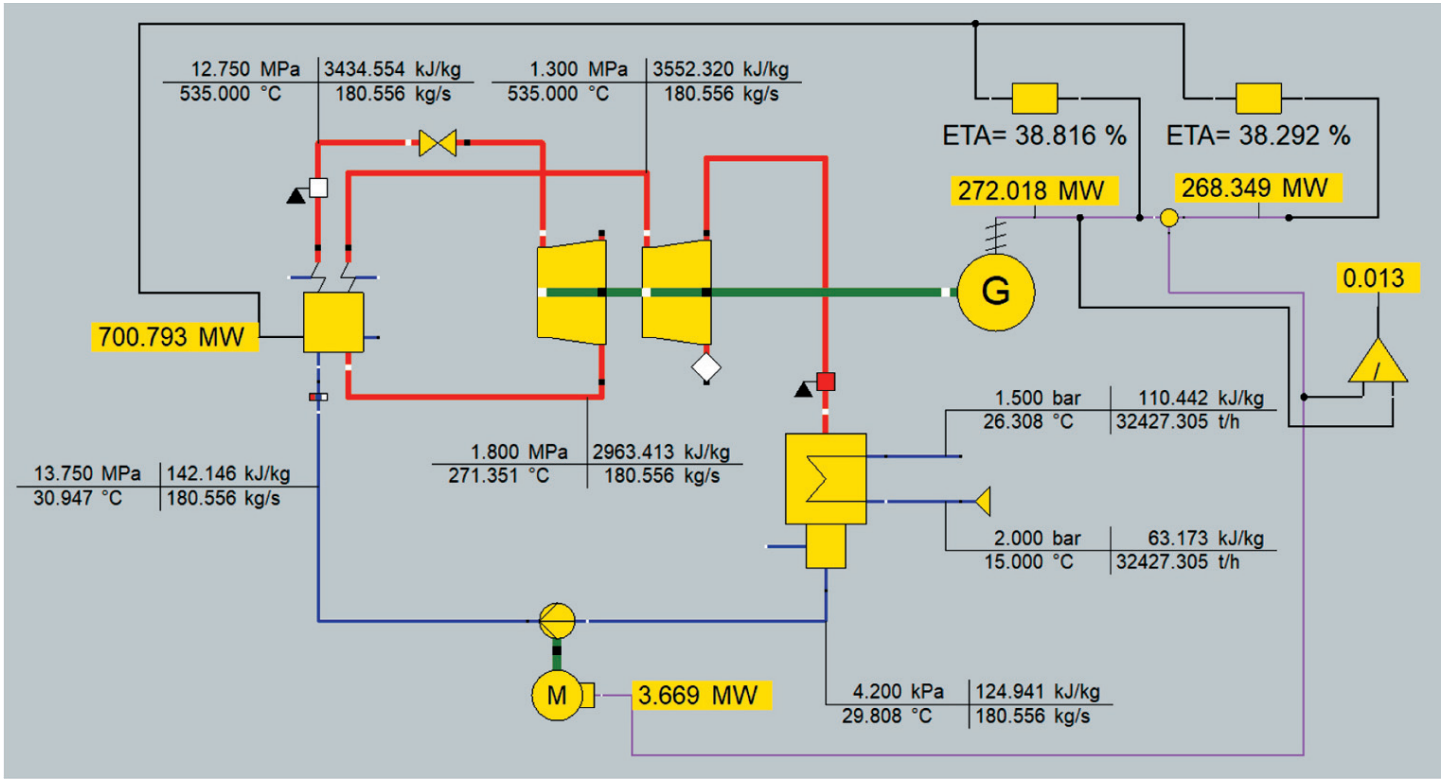
wej charakteryzować będzie się najwyższą sprawnością energetyczną brutto. Obliczenia należy przeprowadzić, badając zmienność ciśnienia pary wtórnej w przedziale od 10 bar do 50 bar, przyjmując krok obliczeniowy równy 2,0 bar. W arkuszu kalkulacyjnym należy wprowadzić wartość 10 w komórce F4 i idąc kolumnami w prawo, wprowadzać wartość o 2,0 większą. Zaznaczyć komórki od F4 do Z4 i na pasku narzędzi nacisnąć *Execute Selection* – przeprowadzone zostaną obliczenia symulacyjne. Wyznaczyć sprawność energetyczną brutto analizowanego obiegu dla każdego z wariantów. Opracować wykres przedstawiający zależność sprawności energetycznej obiegu od ciśnienia pary wtórnej (rys. 31). Na podstawie uzyskanych rezultatów wskazać optymalną wartość ciśnienia międzystopniowego, wprowadzić ją do komponentu 3 w programie Ebsilon i zapisać plik jako *Silownia_Parowa_Przegrzew_wyniki.ebs*.



Rys. 31. Zmiana sprawności energetycznej obiegu brutto w funkcji ciśnienia międzystopniowego

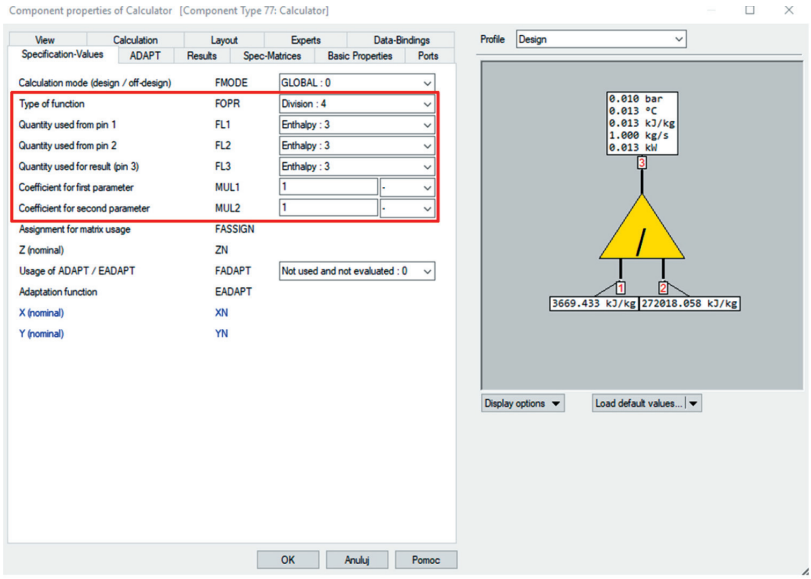
Zadanie dodatkowe

1. Obliczyć sprawność energetyczną obiegu netto dla modelu kondensacyjnej siłowni parowej z przegrzewem wtórnym. Wprowadzić do modelu komponent **Simple splitter (Comp 4)** i połączyć jego wlot (port 1 – *Mainstream inlet*) z linią elektryczną wychodzącą z generatora. Z portu 2 (*Mainstream outlet*) przedłużyć linię elektryczną, umiejscowić na niej komponent **Value-Cross** i wybrać opcję wyświetlania mocy w megawatach. Linię elektryczną z silnika pompy wody zasilającej połączyć z portem 3 (*Branching stream*) w komponencie **Simple splitter**. Przeprowadzone działanie pozwoliło na skierowanie części mocy elektrycznej z generatora do zasilania pompy wody zasilającej kocioł, a tym samym wyznaczenie mocy netto obiegu. W celu wyznaczenia sprawności obiegu brutto i netto należy użyć komponentu **Cycle efficiency meter (Comp 32)**. Porównać uzyskane rezultaty z wynikami przedstawionymi na rysunku 32, które wyznaczone zostały dla wartości ciśnienia międzystopniowego równego 13 bar. Wyniki wyeksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml*. Zapisać plik pod nazwą *Silownia_Parowa_Przegrzew_zadanie_dodatkowe.ebs*.



Rys. 32. Model siłowni parowej z przegrzewem wtórnym wraz z komponentami do określania wskaźników sprawnościowych obiegu

2. Określić wskaźnik potrzeb własnych obiegu. W celu wyznaczenia wskaźnika potrzeb własnych obiegu należy użyć komponentu **Calculator (Comp 77)**. Wskaźnik potrzeb blokowych wyraża iloraz mocy elektrycznej na potrzeby własne oraz mocy elektrycznej obiegu brutto. Komponent **Calculator** należy odpowiednio skonfigurować – port 1 (*Signal entry 1*) należy połączyć z linią mocy elektrycznej pompy wody zasilającej, natomiast port 2 (*Signal entry 2*) z linią mocy elektrycznej obiegu brutto. Wewnątrz komponentu należy określić sposób wykonania obliczeń – w analizowanym przypadku jako działanie matematyczne należy wybrać dzielenie (w polu *Type of function – Division : 4*). Dla pozycji FL1, FL2 i FL3 należy wskazać entalpię (opcja *Enthalpy : 3*) jako wielkość, na podstawie której przeprowadzone będą obliczenia w komponencie. Sposób konfiguracji komponentu **Calculator** został przedstawiony na rysunku 33. Na porcie 3 (*Signal exit*) należy umieścić komponent **Value-Cross** i wybrać opcję wyświetlania entalpii bez wyświetlenia jednostki. Uzyskany rezultat będzie wyrażał wartość wskaźnika potrzeb własnych obiegu. Zapisać plik pod nazwą *Silownia_Parowa_Przegrzew_zadanie_dodatkowe.ebs*.



Rys. 33. Okno konfiguracji komponentu **Calculator** do obliczeń wskaźnika potrzeb własnych

Podsumowanie

Realizacja zadań w ćwiczeniu umożliwiła użytkownikowi modyfikację struktury podstawowej modelu obiegu cieplnego i jego rozbudowę. Użytkownik zapoznał się z możliwością wykonania obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem modułu Microsoft Excel Add-in for Ebsilon. Dzięki zastosowaniu dodatku do programu MS Excel przeprowadzona została analiza wpływu ciśnienia przegrzewu międzystopniowego na sprawność obiegu oraz wskazano jego optymalną wartość.

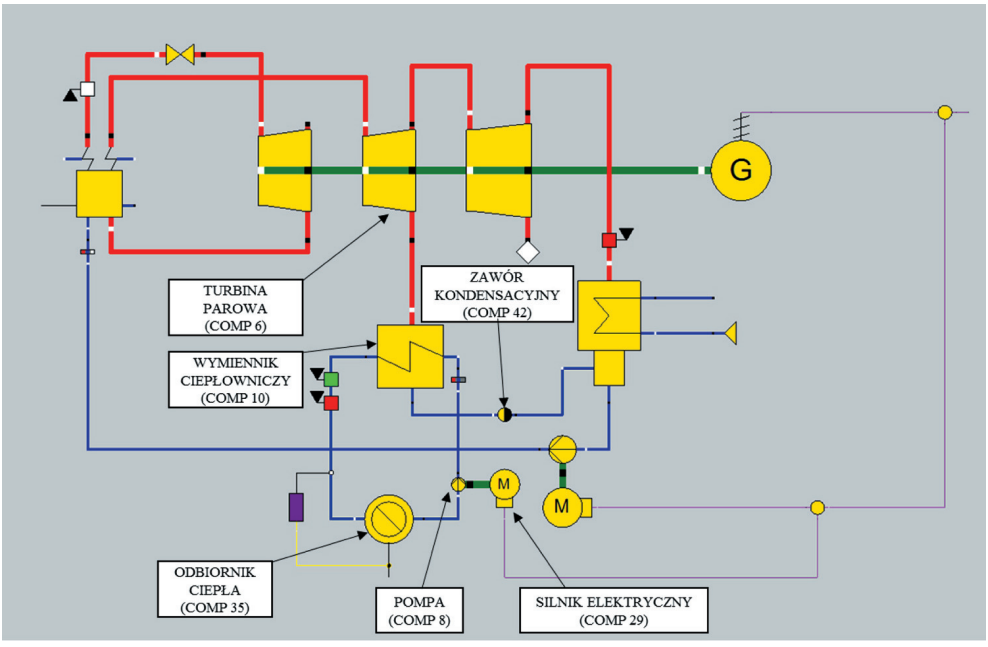
Ćwiczenie 3
Model elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej

Cel ćwiczenia

Opracowanie modelu elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej przez rozbudowanie modelu siłowni parowej z ćwiczenia 2 (rozdz. 3). Przeprowadzenie obliczeń mających na celu określenie wielkości mocy użytecznej kotła oraz sprawności energetycznej obiegu elektrociepłowni. Określenie wpływu uzyskiwanej mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego na parametry eksploatacyjne układu.

Opis zadań do wykonania

Do tego celu należy wykorzystać model przygotowany w ćwiczeniu 2 (rozdz. 3) – *Silownia_Parowa_Przegrzew_zadanie_dodatkowe.ebs*. Do modelu należy wyprowadzić dodatkowe komponenty: turbinę parową (**Steam turbine – Comp 6**), wymiennik ciepłowniczy (**Feed water preheater – Comp 10**) oraz odbiornik ciepła (**Heat consumer – Comp 35**). Struktura komponentów w modelu elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej przedstawiona została na rysunku 34. Zestaw danych potrzebnych do zbudowania modelu i przeprowadzenia obliczeń znajduje się w tabeli 3.



Rys. 34. Struktura połączeń modelu elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej

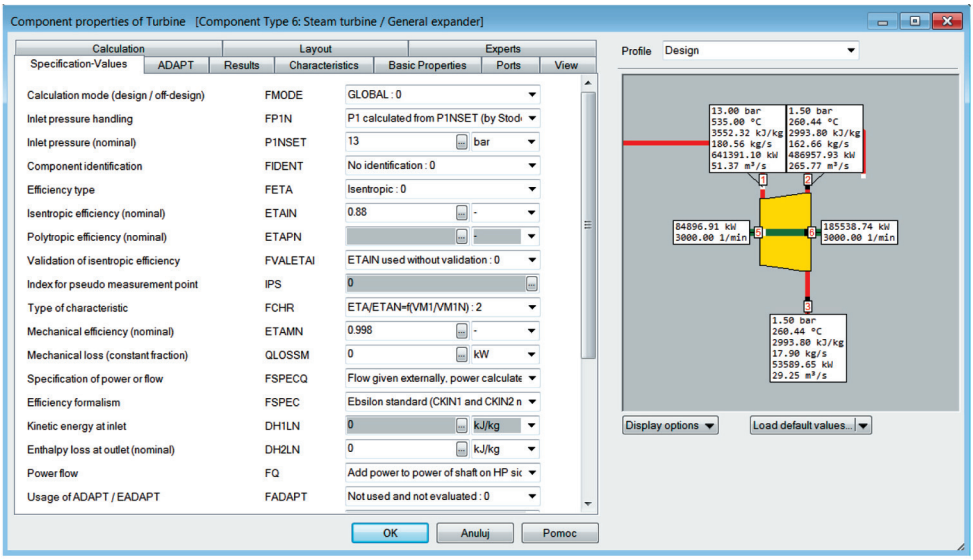
Tabela 3

Dane wejściowe do modelu elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej

Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura wody sieciowej (zasilanie)	80	°C	46
Temperatura wody sieciowej (powrót)	50	°C	35
Ciśnienie wody sieciowej (zasilanie)	200	bar	46
Spadek ciśnienia wody sieciowej	20	bar	35
Moc cieplna wymiennika ciepłowniczego	50	MW	39
Ciśnienie pary do średnioprężnej części turbiny (ii stopień)	13	bar	6
Ciśnienie pary do niskoprężnej części turbiny (iii stopień)	150	kPa	6

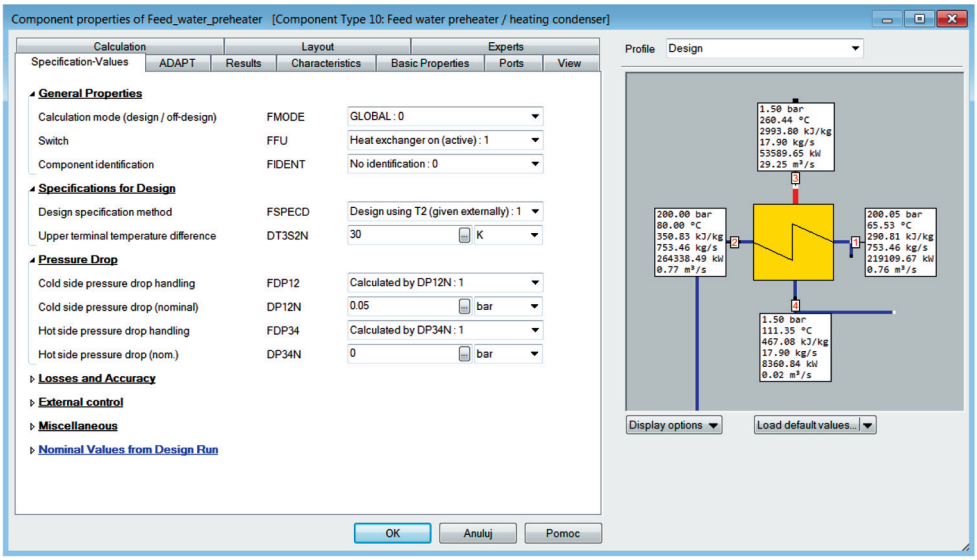
Instrukcja wykonania modelu

1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, uruchomić plik *Silownia_Parowa_Przegrzew_zadanie_dodatkowe.ebs*.
2. Zapisać plik i model pod nazwą *Elektrocieplownia_Upustowo_Kondensacyjna_model.ebs*.
3. Wybrać i umieścić na obszarze pracy następujące komponenty:
   – turbina (**Steam turbine – Comp 6**),
   – wymiennik ciepłowniczy (**Feed water preheater – Comp 10**),
   – odbiornik ciepła (**Heat consumer – Comp 35**),
   – zawór kondensacyjny (**Condensate valve – Comp 42**),
   – pompa (**Pump – Comp 8**),
   – silnik elektryczny (**Motor – Comp 29**).
4. Połączyć w odpowiedniej kolejności wybrane komponenty, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 34.
5. Wprowadzić do modelu dodatkowe komponenty pozwalające na definiowanie danych wejściowych, a następnie uzupełnić je o wartości przedstawione w tabeli 3:
   a) W komponencie turbiny (**Comp 6**) należy dokonać następujących zmian: *Inlet pressure handling (FP1N)* → *P1 calculated from P1NSET (by Stodola equation) : 0*, *Component identification (FIDENT)* → *No identification : 0.* Wprowadzić wartość parametru *Inlet pressure (nominal) (P1NSET)* równą 13,0 bar, a pozostałe ustawienia zdefiniować jak przedstawiono na rysunku 35.



Rys. 35. Okno konfiguracji komponentu turbiny parowej

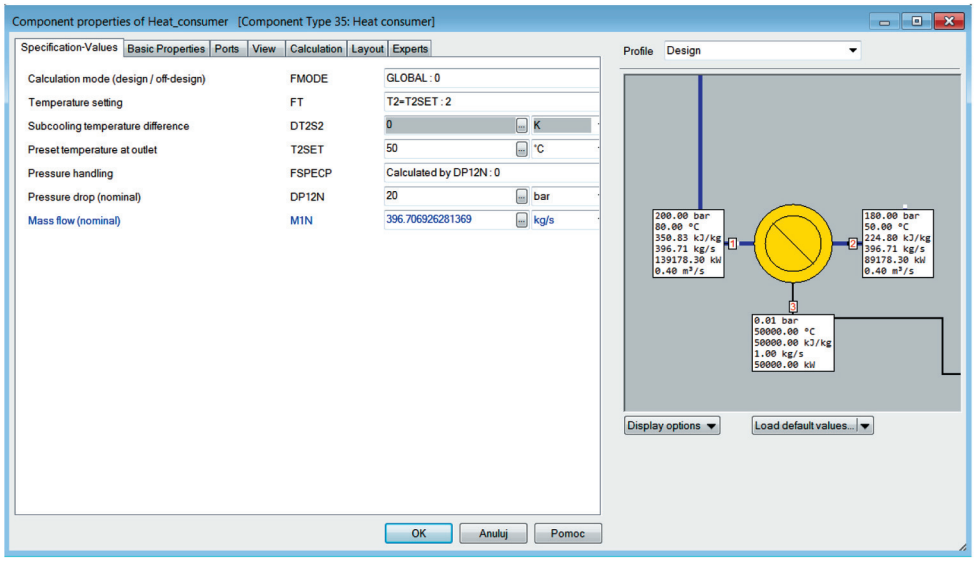
b) W komponencie wymiennika ciepłowniczego (**Comp 10**) dokonać następujących zmian: *Component identification (FIDENT)* → *No identification : 0*, *Design specification method (FSPECD)* → *Design using T2 (given externally) : 1* (rys. 36).



Rys. 36. Okno konfiguracji komponentu wymiennika ciepłowniczego

c) Na linii wody wlotowej do wymiennika umieścić dodatkowo component **Separator** (**Comp 80**) i w polu *Type of separation (FSPEC)* wybrać ustawienie *Mass flow (frequency) : 4*. Pozostałe ustawienia zachować domyślne.

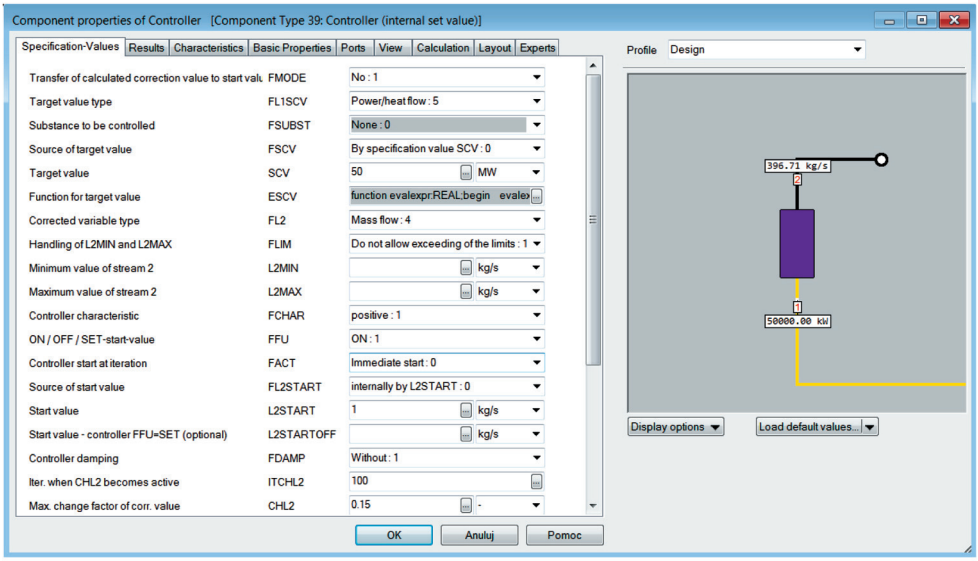
d) Uzupełnić właściwości komponentu odbiornika ciepła (**Comp 35**) dokonując następujących zmian: *Temperature setting (FT)* → *T2=T2SET : 2*, wprowadzenia w polu *Present temperature at outlet (T2SET)* wartości równej 50°C, zmiany *Pressure handling (FSPECP)* → *Calculated by DP12N : 0*, wprowadzenia wartości parametru *Pressure drop (DP12N)* równej 20,0 bar. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same, jak przedstawiono na rysunku 37.



Rys. 37. Okno konfiguracji komponentu odbiornika ciepła

e) Dla komponentu pompy oraz silnika elektrycznego wykorzystać te same ustawienia oraz dane wejściowe jak w ćwiczeniu 2 (rozdz. 3).

f) Do struktury modelu należy wprowadzić dodatkowy komponent **Controller (internal set value) (Comp 39)**. Jego zadaniem będzie dotrzymanie wymaganej mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego przez regulację przepływu masowego wody sieciowej w układzie ciepłowniczym. W tym celu należy zaznaczyć następujące ustawienia (rys. 38).
   - *Target value type (FL1SCV)* → *Power/heat flow : 5*,
   - *Source of target value (FSCV)* → *By specification value SCV : 0*,
   - wprowadzić wartość parametru *Target value (SCV)* równą 50,0 MW,
   - *Corrected variable type (FL2)* → *Mass flow : 4*,
   - *Controller characteristic (FCHAR)* → *positive : 1*,
   - *Source of start value* → *internally by L2START : 0*.

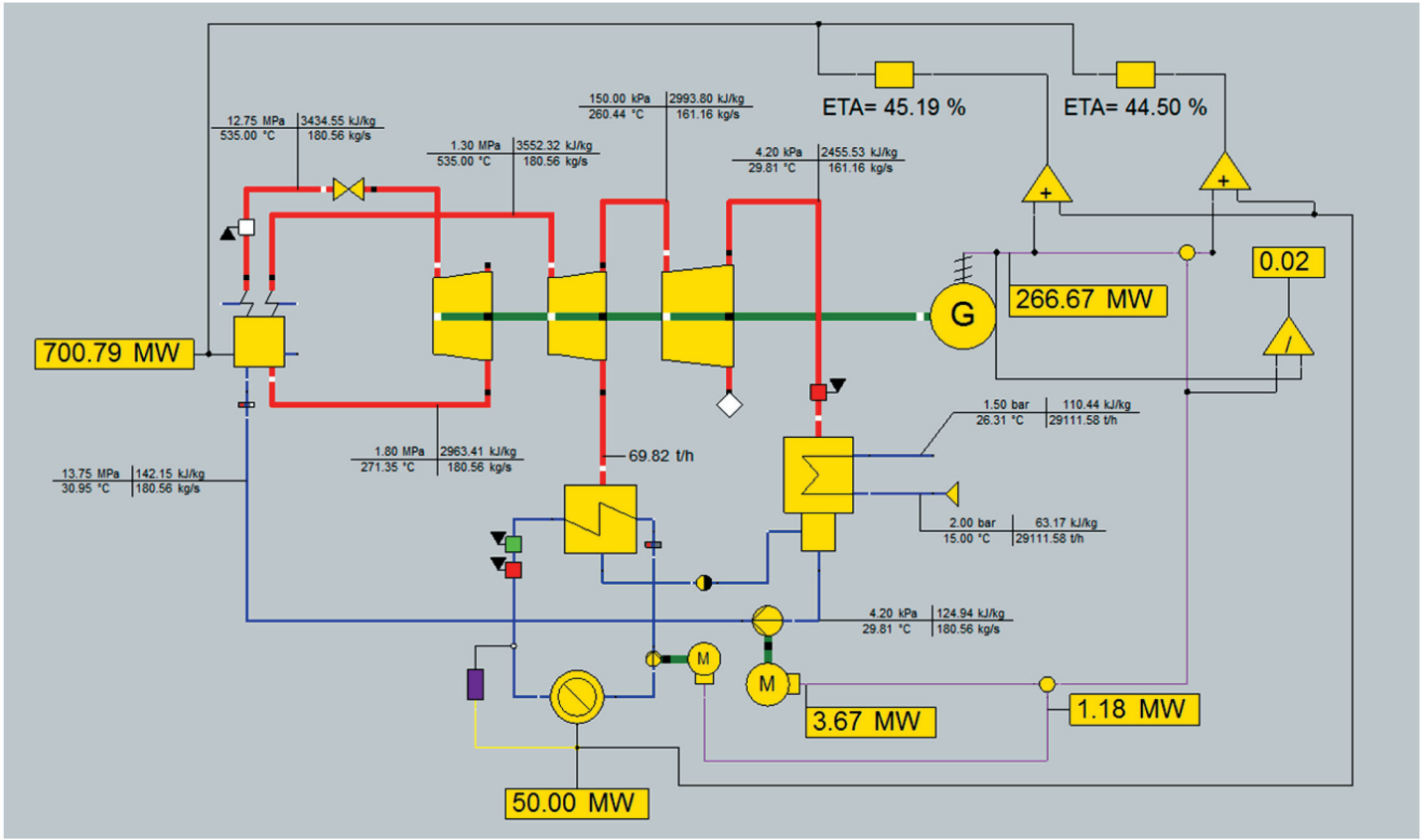


Rys. 38. Okno konfiguracji komponentu kontrolera mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego

6. Przeprowadzić obliczenia oraz zweryfikować uzyskane wyniki z wartościami przedstawionymi na rysunku 39. Wyniki obliczeń eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*). Zapisać plik po nazwą *Elektrocieplownia_Upustowo_Kondensacyjna_wyniki.ebs*.

Zadanie dodatkowe

1. Utworzyć trzy nowe profile obliczeniowe celem przeprowadzenia symulacji układu w trybie *off-design* dla zmiennego przepływu masowego pary świeżej oraz mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego. Utworzonym profilom nadać odpowiednio nazwy: *M180kg/s_50MW*, *M140kg/s_50MW* oraz *M100kg/s_50MW*. W kolejnym kroku dla każdego z utworzonych profili wprowadzić dodatkowe profile *off-design* zawierające zmienną wartość mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego: 25,0 MW oraz 0,0 MW.
2. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych, a wyniki dla poszczególnych wariantów eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*). Opracować charakterystyki układu przedstawiające zmienność uzyskiwanej sprawności energetycznej układu z wykorzystaniem programu MS Excel.
3. Zapisać plik pod nazwą *Elektrocieplownia_Upustowo_Kondensacyjna_zadanie_dodatkowe.ebs*.



Rys. 39. Model elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej wraz z wynikami obliczeń

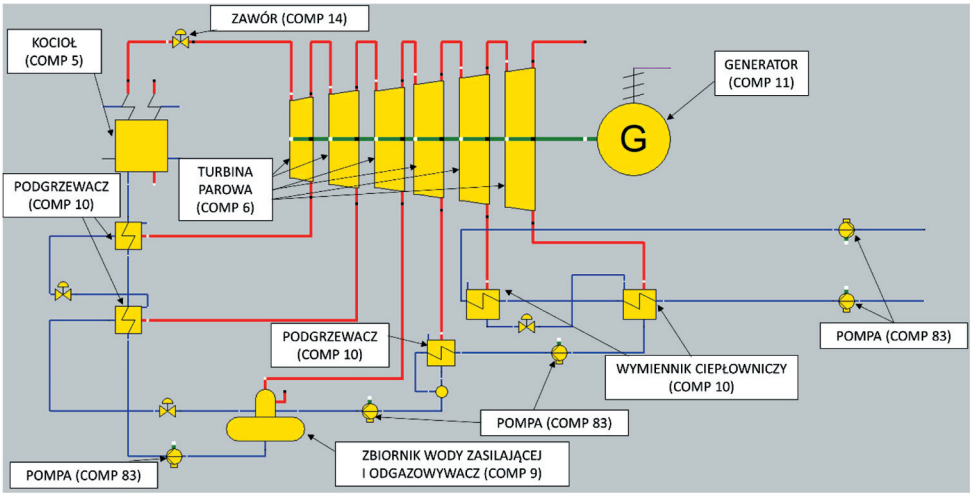
Podsumowanie

Wykonanie ćwiczenia pozwoliło na opracowanie modelu elektrociepłowni upustowo-kondensacyjnej. Użytkownik powinien opanować sposób działania komponentów pozwalających na symulację pracy przedstawionej elektrociepłowni. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wariantowych układu w trybie *off-design* użytkownik potrafi opracować charakterystyki wpływu poboru pary z upustu ciepłowniczego na sprawność energetyczną elektrociepłowni.

Ćwiczenie 4
Model bloku elektrociepłowni z turbiną przeciwprężną

Cel ćwiczenia

Opracowanie modelu bloku ciepłowniczego zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 40. Zapoznanie się z podstawowymi komponentami niezbędnymi do opracowania modelu bloku będącego częścią elektrociepłowni parowej wytwarzającej energię elektryczną i ciepło w skojarzeniu. Uzupełnienie modelu o zmierzone wartości parametrów pracy sieci ciepłowniczej: strumień masowy wody sieciowej, ciśnienie wody na zasilaniu i powrocie z sieci oraz temperaturę wody powrotnej. Przeprowadzenie symulacji pracy bloku ciepłowniczego, wyznaczenie podstawowych parametrów pracy bloku oraz stopnia skojarzenia.



Rys. 40. Blok ciepłowniczy i jego podstawowe komponenty

Opis zadań do wykonania

W celu wykonania ćwiczenia należy opracować model bloku ciepłowniczego zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 40. Model powinien zawierać następujące

podstawowe elementy: kocioł, zawór regulacyjny, sześciostopniową turbinę parową przeciwprężną, generator, wymiennik ciepłowniczy, pompę oraz regeneracyjny podgrzewacz wody zasilającej kocioł. Dane wejściowe zebrano w tabeli 4.

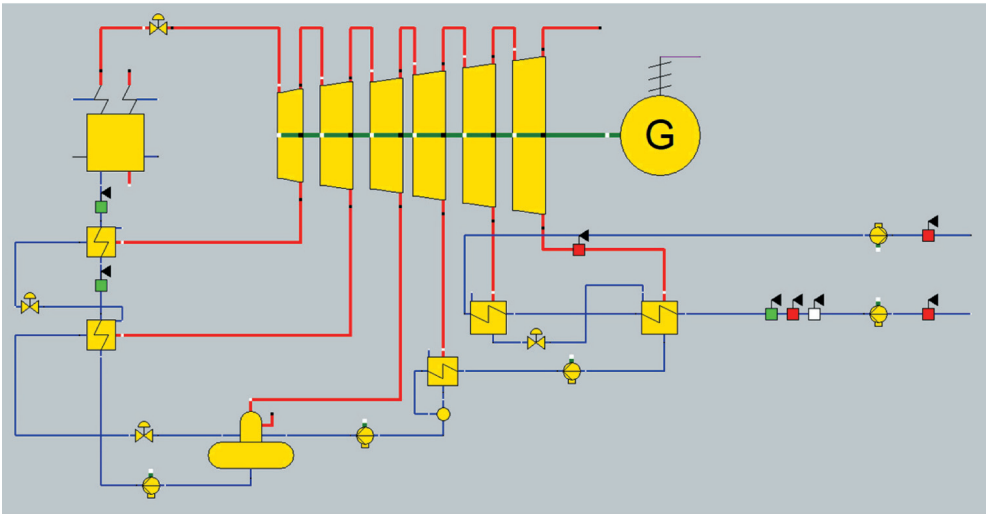
Tabela 4

Dane wejściowe do modelu elektrociepłowni z turbiną przeciwprężną

Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura wody zasilającej kocioł	205,00	°C	46
Temperatura wody zasilającej pomiędzy podgrzewaczami	165,00	°C	46
Temperatura pary świeżej	535,00	°C	5
Ciśnienie pary świeżej	12,75	MPa	5
Ciśnienie pary świeżej za zaworem regulacyjnym (na wlocie do i stopnia turbiny)	12,00	MPa	6
Sprawność izentropowa I stopnia turbiny	70,50	%	6
Ciśnienie pary na wlocie do II stopnia turbiny	1,83	MPa	6
Sprawność izentropowa II stopnia turbiny	77,00	%	6
Ciśnienie pary na wlocie do III stopnia turbiny	0,95	MPa	6
Sprawność izentropowa III stopnia turbiny	76,30	%	6
Ciśnienie pary na wlocie do IV stopnia turbiny	0,40	MPa	6
Sprawność izentropowa IV stopnia turbiny	81,10	%	6
Ciśnienie pary na wlocie do V stopnia turbiny	0,22	MPa	6
Sprawność izentropowa V stopnia turbiny	82,20	%	6
Ciśnienie pary na wlocie do VI stopnia turbiny	0,09	MPa	6
Sprawność izentropowa VI stopnia turbiny	81,40	%	6
Ciśnienie pary za ostatnim stopniem turbiny	0,42	bar	46
Ciśnienie wody sieciowej na powrocie z sieci ciepłowniczej, przed pompą obiegową	2,00	bar	46
Ciśnienie wody sieciowej na powrocie z sieci ciepłowniczej, za pompą obiegową	5,00	bar	46
Ciśnienie wody sieciowej na zasilaniu sieci ciepłowniczej, za pompą obiegową	10,00	bar	46
Strumień masowy wody w sieci ciepłowniczej	620,00	kg/s	46
Temperatura wody w sieci ciepłowniczej	52,00	°C	46

Instrukcja wykonania modelu

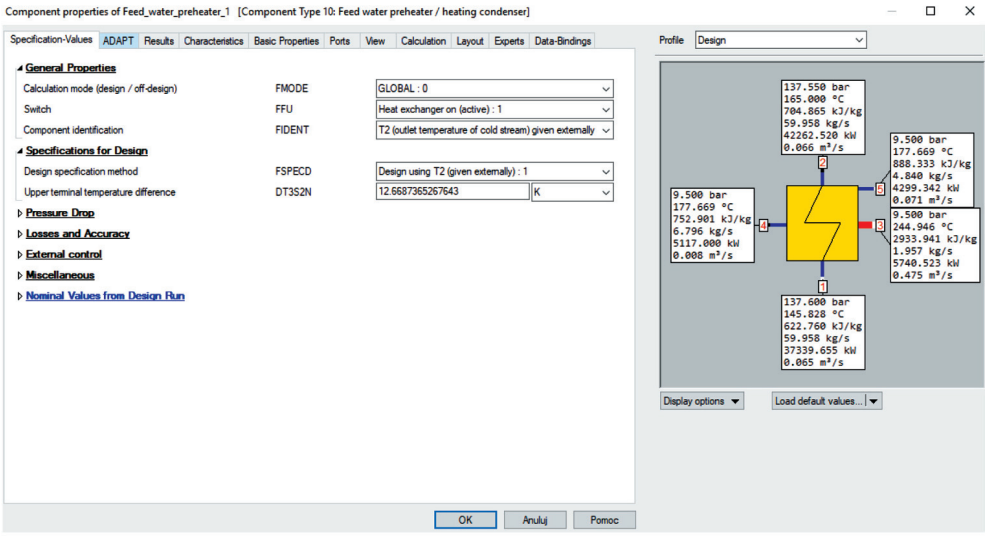
1. Należy otworzyć program Ebsilon®Professional i zapisać plik pod nazwą *Blok_cieplowniczy_model.ebs*.
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy wszystkie potrzebne komponenty:
   – kocioł (**Steam generator – Comp 5**),
   – zawór regulacyjny (**Control valve – Comp 14**),
   – turbinę parową (sześć stopni) (**Steam turbine – Comp 6**),
   – generator (**Generator – Comp 11**),
   – wymiennik ciepłowniczy (**Heating condenser – Comp 10**),
   – pompę (**Pump, with characteristic field for speed – Comp 83**),
   – podgrzewacz wody zasilającej (**Feed water preheater – Comp 10**),
   – mieszalnik (**Simple mixer – Comp 37**),
   – zbiornik wody zasilającej i odgazowywacz (**Feed water tank, deareator – Comp 9**).
3. Połączyć wybrane komponenty zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 41.



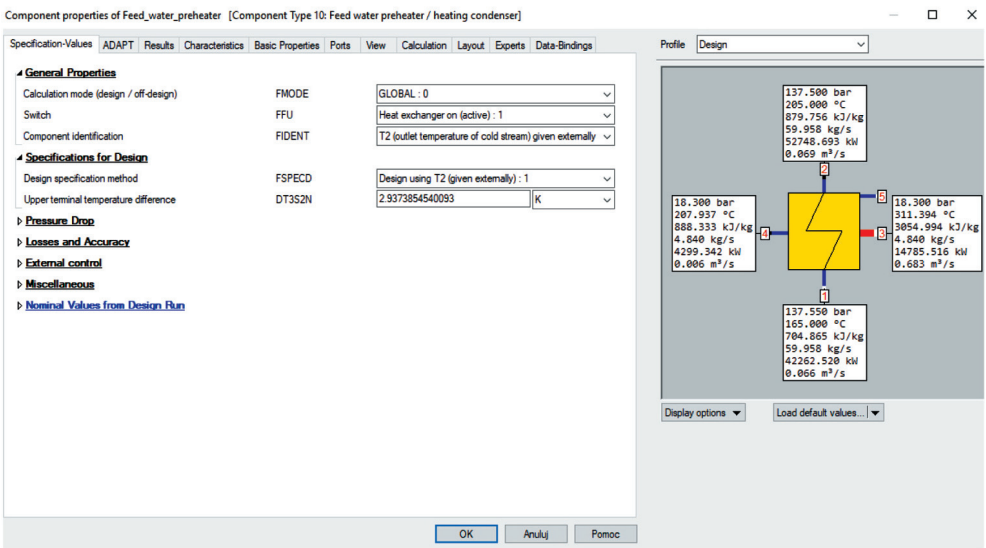
Rys. 41. Model bloku ciepłowniczego uzupełniony o komponenty (**Comp 46**) pozwalające na wprowadzanie danych wejściowych w postaci temperatury (kolor zielony), ciśnienia (kolor czerwony) i strumienia masowego (kolor biały)

4. Uzupełnić strukturę modelu o dodatkowe komponenty (rys. 41) umożliwiające definiowanie danych wejściowych. Wprowadzić dane w odpowiednim miejscu i komponencie na podstawie zestawienia zaprezentowanego w tabeli 4:
   a) W komponencie kotła (**Steam generator – Comp 5**) zdefiniować wartości temperatury i ciśnienia produkowanej pary świeżej.

b) W komponentach regeneracyjnych podgrzewaczy wody zasilającej kocioł (**Heating condenser – Comp 10**) dokonać zmiany ustawienia i sposobu wykonywania obliczeń (rys. 42 i 43). Opcje *Component identification* ustawić jako *T2 (outlet temperaturę of cold stream) given externally in off-design, KA calculated : 2*, a *Design specification method* dla *T2 (given externally) : 1*.

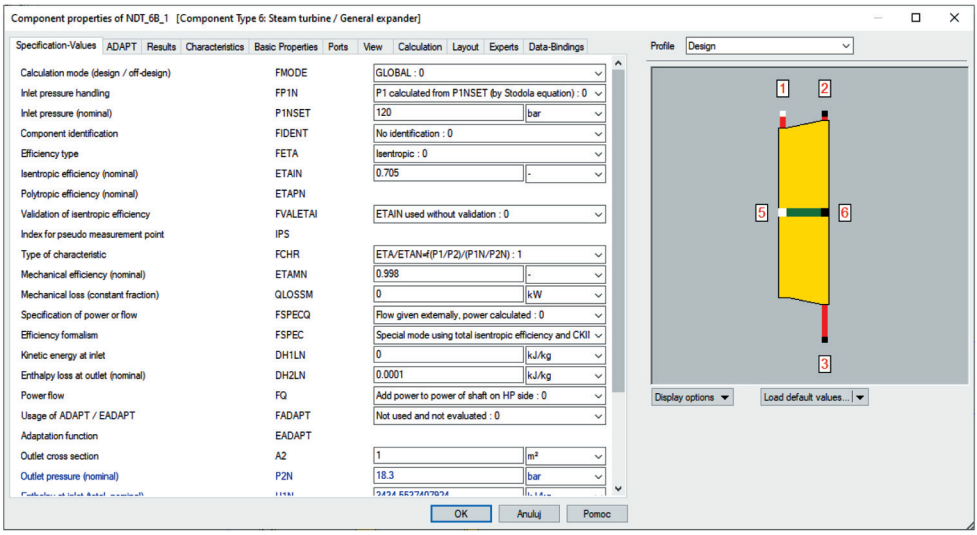


Rys. 42. Ustawienia dla komponentu podgrzewacza wody zasilającej kocioł (nr 1)



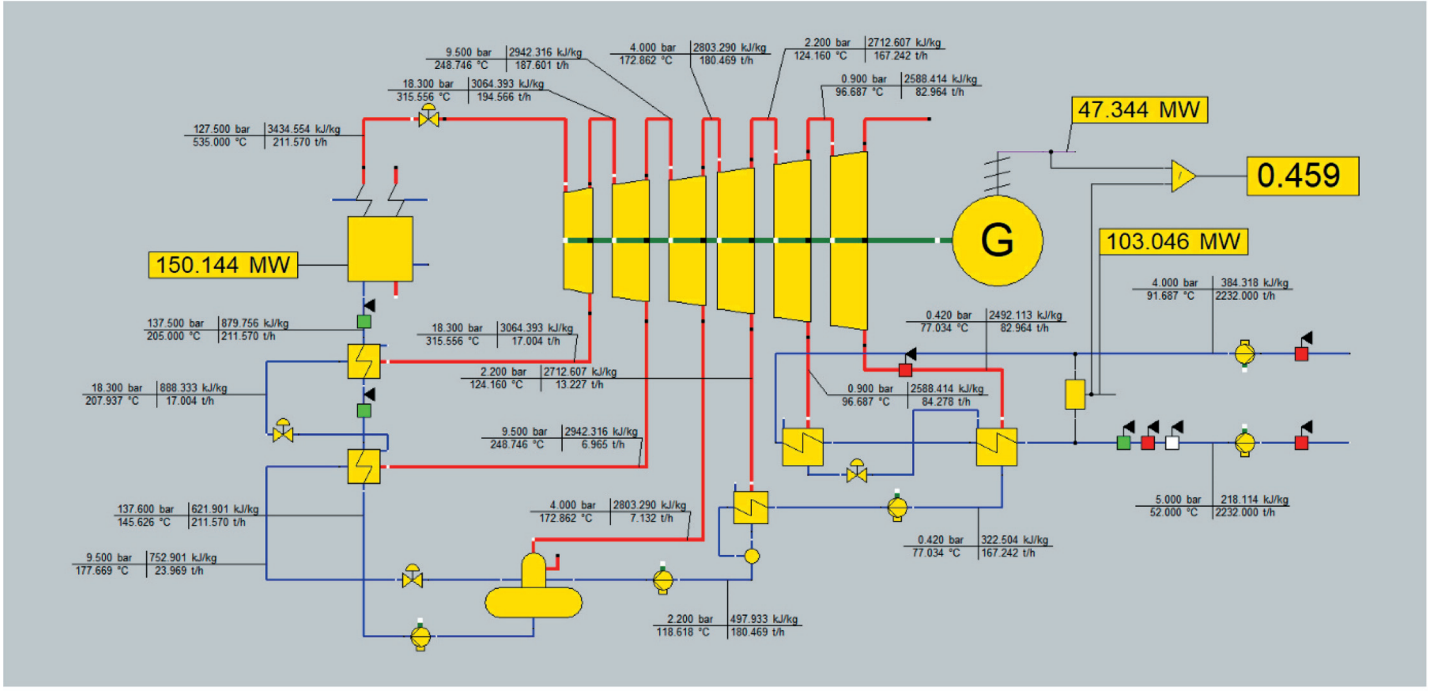
Rys. 43. Ustawienia dla komponentu podgrzewacza wody zasilającej kocioł (nr 2)

c) Ustawić wartość ciśnienia na wlocie do pierwszego stopnia turbiny parowej na poziomie 120 bar (*Inlet pressure (nominal)*) oraz wartość sprawności izentropowej równą 0,705 (*Isentropic efficiency (nominal)*), jak przedstawiono na rysunku 44.

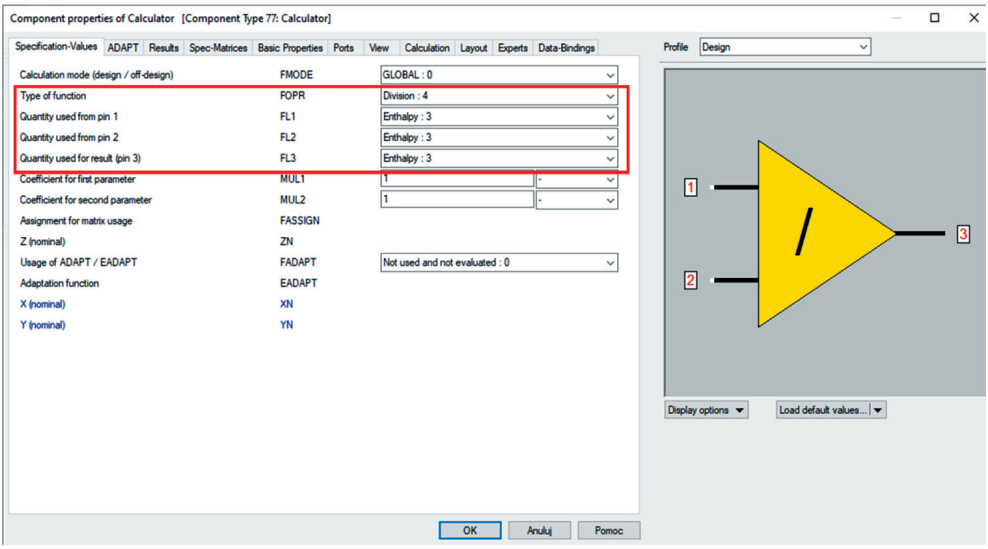


Rys. 44. Uzupełniony komponent dla pierwszego stopnia turbiny parowej

5. Komponenty dla wszystkich stopni turbiny parowej (I–VI stopień) uzupełnić o wartości ciśnienia na wlocie (*Inlet pressure (nominal)*) oraz sprawności izentropowej (*Isentropic efficiency (nominal)*), wyznaczone eksperymentalnie dla każdego stopnia turbiny i zestawione w tabeli 4.
6. Uzupełnić wszystkie komponenty odpowiedzialne za wprowadzenie zmierzonych danych wejściowych (**Measured value input – Comp 46**) o wartości, które przedstawiono w tabeli 4.
7. Zapisać plik pod nazwą *Blok_cieplowniczy_model.ebs*.
8. Przeprowadzić obliczenia (wybierając opcję *Simulation* lub wciskając klawisz F9), a uzyskane wyniki wyświetlić z wykorzystaniem opcji *Insert-value cross*, w punktach przedstawionych na rysunku 45. Wyświetlić obliczoną wartość mocy generatora oraz wyznaczyć moc przekazywaną do sieci ciepłowniczej z wykorzystaniem komponentu **Difference meter (Comp 30)**.
9. Wprowadzić do modelu komponent **Calculator (Comp 77)** pozwalający na obliczanie ogólnego wskaźnika skojarzenia (rys. 45). W komponencie **Calculator**, w polu *Type of function* ustawić wartość *Division : 4*, a w miejscu *Quantity used from pin 1*, *Quantity used from pin 2* oraz *Quantity used for result (pin 3)* ustawić wartość *Enthalpy : 3* (rys. 46).

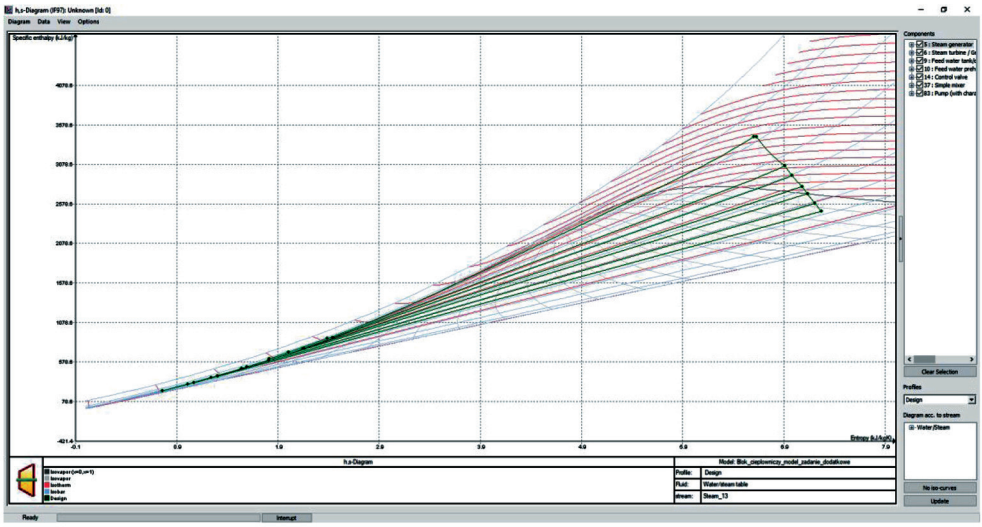


Rys. 45. Wyniki symulacji pracy bloku ciepłowniczego

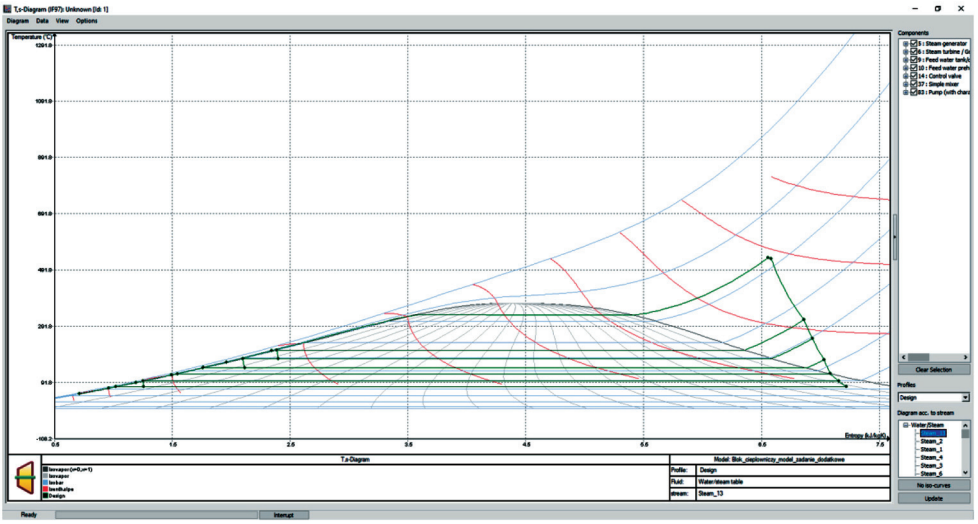


Rys. 46. Ustawienie komponentu **Calculator**
w celu wyznaczenia ogólnego wskaźnika skojarzenia

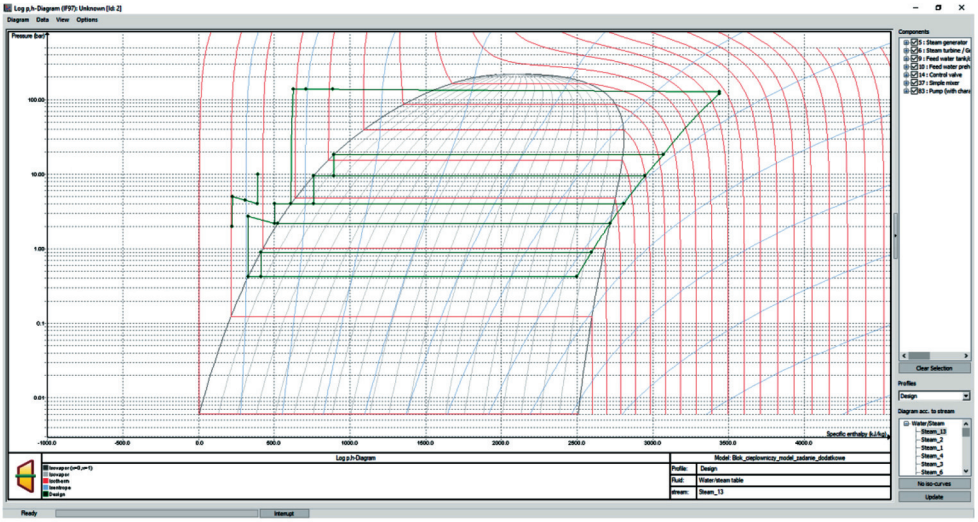
10. Przedstawić wyniki na wykresie h-s entalpia–entropia (rys. 47), T-s temperatura–entropia (rys. 48) oraz log p-h ciśnienie–entalpia (rys. 49) z wykorzystaniem funkcji *h-s Diagram, T-s Diagram* oraz *log p,h Diagram*. Wyniki wyeksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml.* Zapisać plik pod nazwą *Blok_cieplowniczy_wyniki.ebs*.



Rys. 47. Wykres w układzie współrzędnych h-s pracy bloku ciepłowniczego



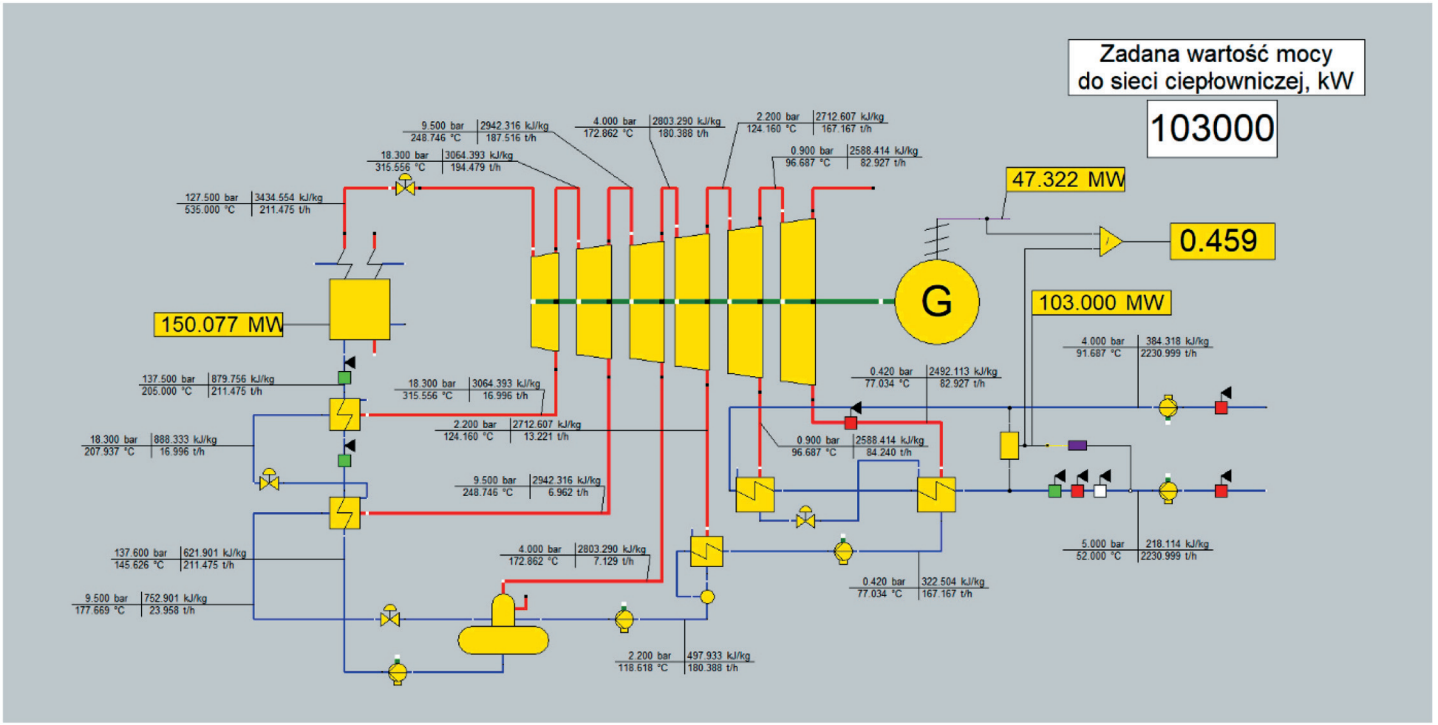
Rys. 48. Wykres w układzie współrzędnych T-s pracy bloku ciepłowniczego



Rys. 49. Wykres w układzie współrzędnych log p-h pracy bloku ciepłowniczego

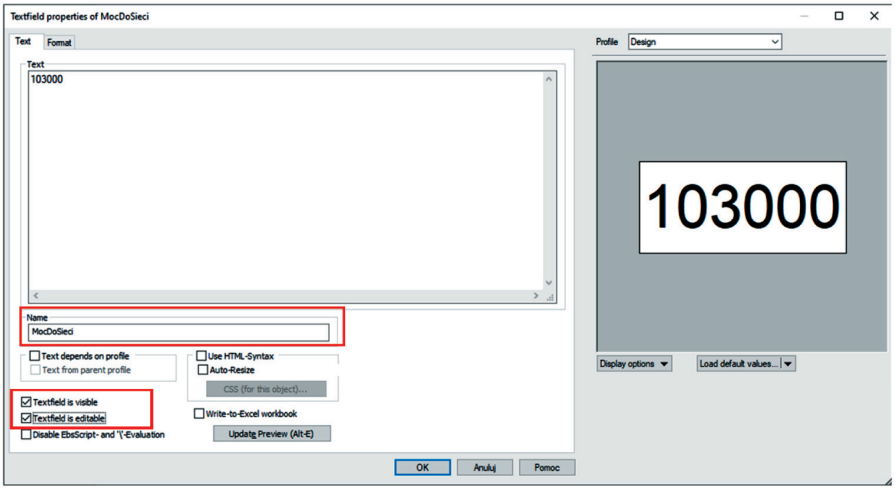
Zadanie dodatkowe

1. Przeprowadzić analizę pracy bloku ciepłowniczego dla zmiennego zapotrzebowania na ciepło przekazywane do miejskiej sieci ciepłowniczej. W tym celu należy rozbudować model o następujące komponenty (rys. 50):
   – kontroler (**Controller (internal set value) – Comp 39**),
   – obiekt tekstowy (**Text field**).



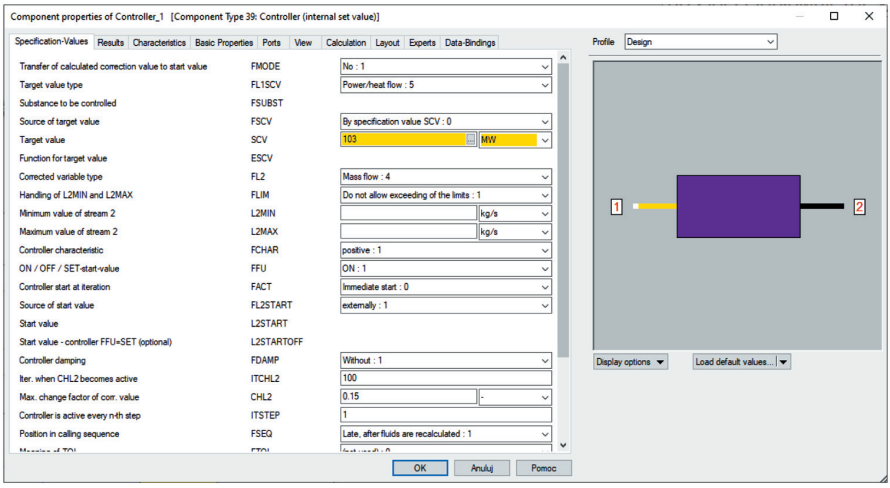
Rys. 50. Model bloku ciepłowniczego z wyznaczoną wartością ogólnego wskaźnika skojarzenia oraz polem tekstowym pozwalającym na definiowanie zapotrzebowania na moc cieplną

2. Umieścić w modelu dwa osobne pola tekstowe, wykorzystując opcję *Insert* → *Text field.* W pierwszym polu wprowadzić opis w postaci tekstu *Zadana wartość mocy do sieci ciepłowniczej, kW* (rys. 50). W drugim polu tekstowym zaznaczyć możliwość edytowania treści (*Textfield is editable*) oraz wprowadzić wartość mocy cieplnej. W polu *Name* wprowadzić nazwę obiektu, np. *MocDoSieci* (rys. 51).



Rys. 51. Pole tekstowe przygotowane do wprowadzania danych z poziomu modelu

3. W komponencie kontrolera (**Comp 39**) w polu *Target value type* wybrać wartość *Power/heat flow : 5*, a w polu *Corrected variable type* opcję *Mass flow : 4* (rys. 52).



Rys. 52. Ustawienie komponentu kontrolera (**Comp 39**)
w celu definiowania zapotrzebowania na moc cieplną sieci ciepłowniczej

4. W polu *Target value* (**Comp 39**) zdefiniować wartość ustawioną w obiekcie tekstowym przez wpisanie następującej funkcji: *MocDoSieci.text*, która pozwoli zaimportować wartość z pola tekstowego. Po poprawnym wpisaniu funkcji w polu *Target value* powinien pojawić się następujący opis: *MocDoSieci.text makeValue WithUnit(real(MocDoSieci.Text), UNIT_kW).*
5. Dla opracowanego modelu przeprowadzić analizę wpływu zmiany zapotrzebowania sieci ciepłowniczej (w zakresie od 50 000 kW do 103 000 kW) na moc elektryczną produkowaną w generatorze turbiny. Zapisać plik pod nazwą *Blok_cieplowniczy_zadanie_dodatkowe.ebs*.

Podsumowanie

Wykonanie zadania pozwoliło zapoznać się z podstawowymi komponentami niezbędnymi do budowy modelu bloku elektrociepłowni z turbiną przeciwprężną. Użytkownik zaznajomił się z sposobami wyznaczenia podstawowych parametrów pracy bloku oraz wykresów w trzech różnych układach współrzędnych. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na wyznaczenie wytwarzanej mocy elektrycznej w generatorze w zależności od różnego zapotrzebowania sieci ciepłowniczej na moc cieplną. W zadaniu przedstawiona została również możliwość definiowania danych wejściowych z wykorzystaniem pola tekstowego.

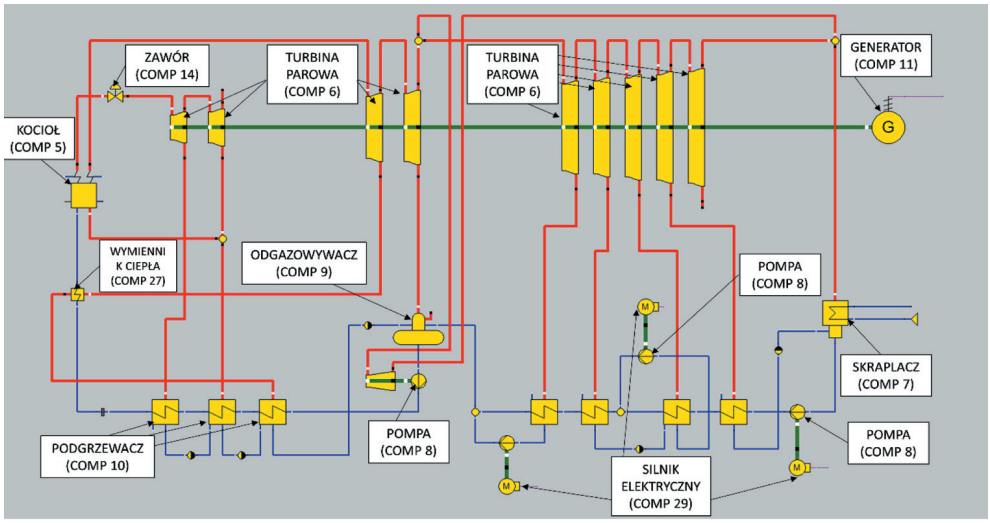
Ćwiczenie 5
Model bloku elektrowni na parametry nadkrytyczne

Cel ćwiczenia

Wykonanie modelu i przeprowadzenie symulacji pracy bloku elektrowni na parametry nadkrytyczne. Wykonanie analizy pracy bloku dla różnych wydajności, wyznaczenie podstawowych parametrów eksploatacyjnych w trakcie pracy elektrowni na parametry nadkrytyczne.

Opis zadań do wykonania

W celu wykonania ćwiczenia należy stworzyć model bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne, który został zaprezentowany na rysunku 53. Model składa się z podstawowych komponentów, takich jak kocioł, zawór regulacyjny, wysokoprężna turbina parowa, średnioprężna turbina parowa, niskoprężna turbina parowa, generator, skraplacz, pompa, nisko- i wysokoprężne regeneracyjne podgrzewacze wody zasilającej oraz odgazowywacz. Dane wejściowe zebrano w tabeli 5.



Rys. 53. Model bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne

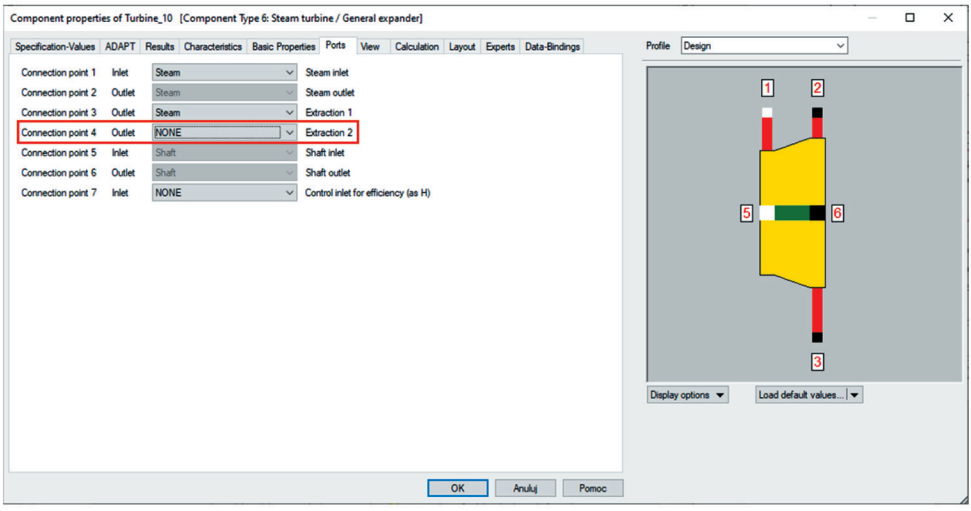
Tabela 5

Dane wejściowe do budowy modelu bloku na parametry nadkrytyczne

Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura pary świeżej	600,00	°C	5
Ciśnienie pary świeżej	280,00	bar	5
Temperatura pary wtórnej	600,00	°C	5
Spadek ciśnienia pary świeżej	55,00	bar	5
Spadek ciśnienia pary wtórnej	5,00	bar	5
Ciśnienie pary na wlocie do I stopnia turbiny	275,00	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do II stopnia turbiny	70,00	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do III stopnia turbiny	40,00	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do IV stopnia turbiny	25,00	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do V stopnia turbiny	15,00	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do VI stopnia turbiny	7,00	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do VII stopnia turbiny	3,00	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do VIII stopnia turbiny	0,90	bar	6
Ciśnienie pary na wlocie do IX stopnia turbiny	0,30	bar	6
Przepływ pary świeżej	925,00	t/h	46
Ciśnienie w skraplaczu	0,05	bar	46

Instrukcja wykonania modelu

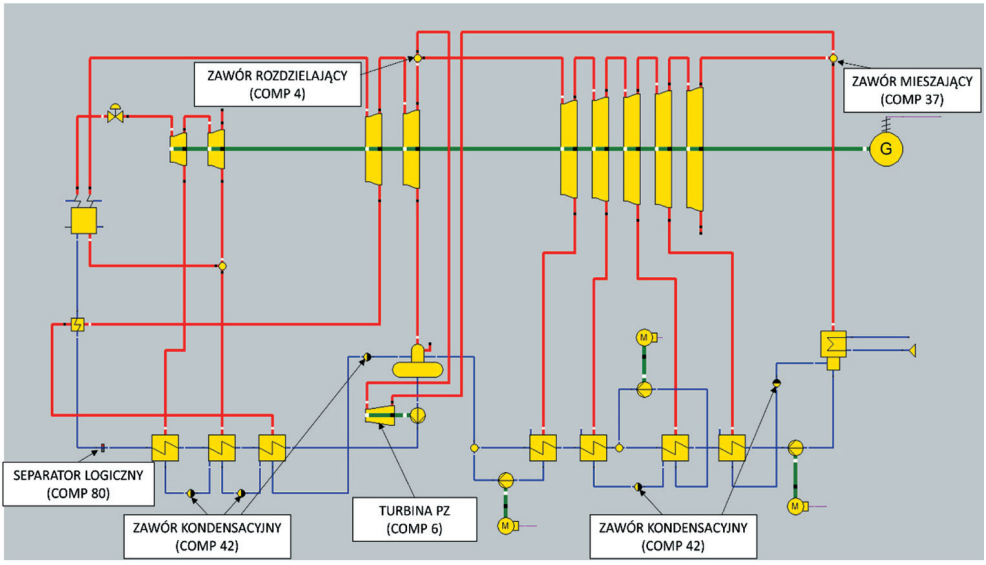
1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, nowy plik zapisać pod nazwą *Blok_Parametry_Nadkrytyczne_model.ebs.*
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy następujące główne komponenty:
   - kocioł (**Steam generator – Comp 5**),
   - zawór regulacyjny (**Control valve – Comp 14**),
   - turbina (**Steam turbine – Comp 6**),
   - skraplacz (**Condenser – Comp 7**),
   - pompa (**Pump – Comp 8**),
   - odgazowywacz (**Deareator – Comp 9**),
   - silnik elektryczny (**Motor – Comp 29**),
   - generator (**Generator – Comp 11**),
   - podgrzewacz wody zasilającej (**Feed water preheater – Comp 10**),
   - wymiennik ciepła (**Aftercooler – Comp 27**).
3. Rozmieścić i połączyć wszystkie komponenty zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 53.
4. W celu odwzorowania pełnego modelu jak na rysunku 53 należy dodatkowo:
   a) Dokonać modyfikacji wyglądu poszczególnych stopni turbiny parowej: w komponencie turbiny (**Comp 6**) w zakładce *Ports* ustawić w *Connection point 4* (*Extraction 2*) wartość *NONE* (rys. 54).



Rys. 54. Modyfikacja stopnia turbiny parowej

   b) Uzupełnić model o dodatkowe komponenty umożliwiające symulowanie pracy bloku elektrowni (rys. 55):

– turbina parowa zasilająca pompę wody zasilającej (**Steam turbine – Comp 6**),
– zawór kondensacyjny (**Condensate valve – Comp 42**) – uzupełnić w pięciu miejscach,
– zawór rozdzielający przepływ pary (**Simple splitter – Comp 4**),
– zawór mieszający strumienie pary (**Simple mixer – Comp 37**),
– separator logiczny (**Separator – Comp 80**).

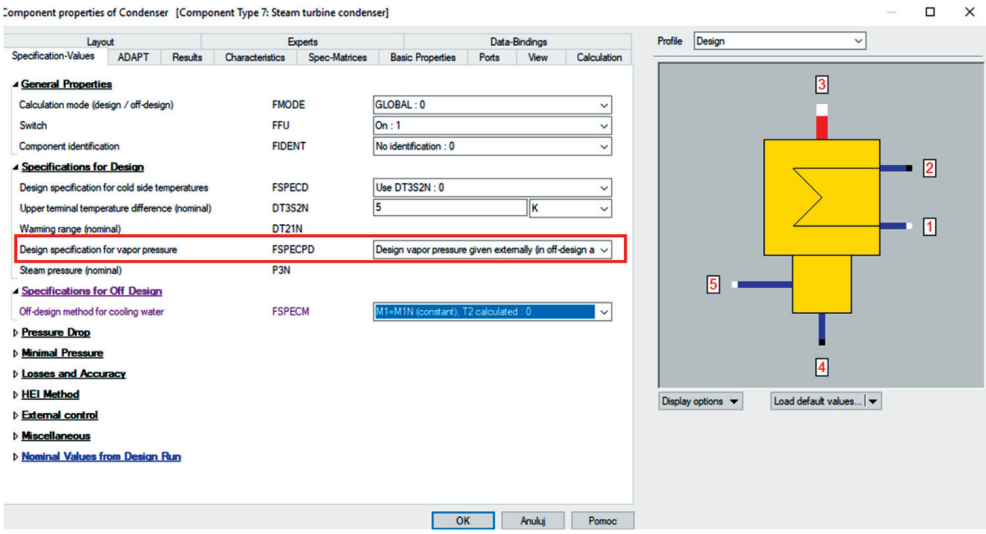


Rys. 55. Model bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne z zaznaczonymi dodatkowymi komponentami

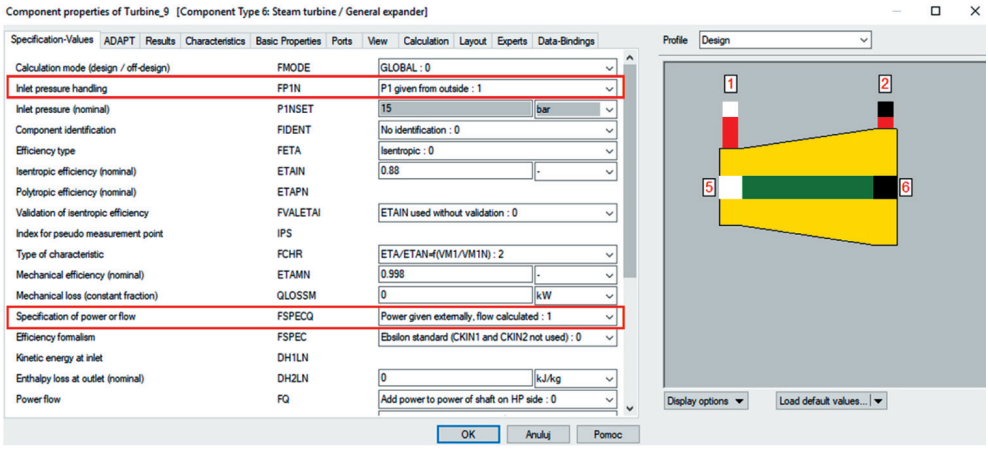
c) Uzupełnić model o komponent **Measuring point (Comp 46)** pozwalający na wprowadzanie niezbędnych danych wejściowych (przepływ pary świeżej, ciśnienie w skraplaczu).
d) Zmodyfikować sposób definiowania ciśnienia w skraplaczu. W komponencie skraplacza w polu *Design specification for vapor pressure* należy wybrać opcję *Design vapor pressure given externally (in off-design as start value) : –1* (rys. 56).
e) W komponencie turbiny pompy wody zasilającej (rys. 57) zmienić sposób definiowania wartości ciśnienia na *P1 give from outside* oraz zmienić sposób wyznaczania przepływu na *Power given externally, flow calcualted : 1.*
f) Zapisać plik pod nazwą *Blok_parametry_nadkrytyczne_model.ebs.*

5. Przeprowadzić obliczenia (wybierając opcję *Simulation* lub wciskając klawisz F9), a wyniki obliczeń zwizualizować za pomocą funkcji *Insert value-cross* (rys. 58).

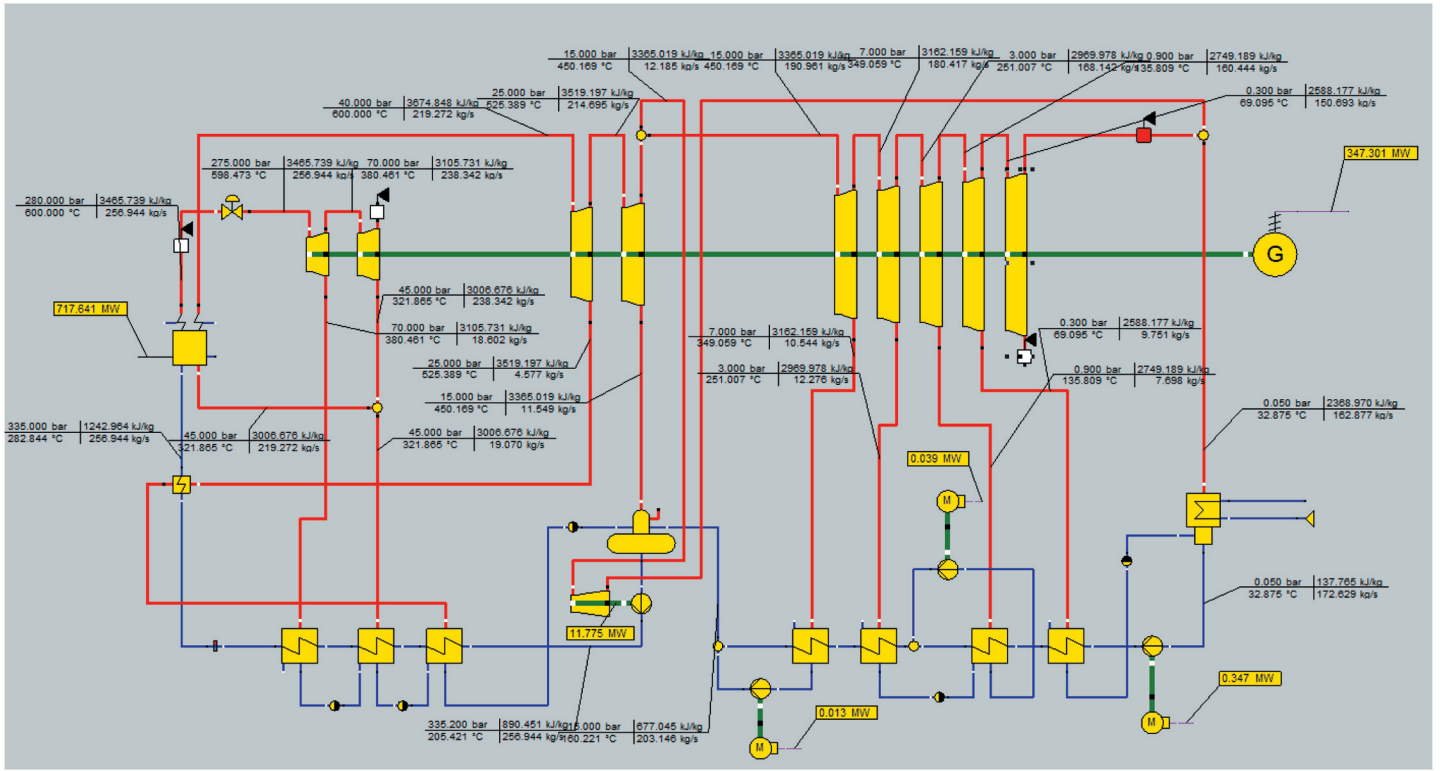
6. Po przeprowadzeniu symulacji obliczenia powinny zakończyć się sukcesem z trzema ostrzeżeniami (*Warnings*), co przedstawione zostało na rysunku 59. Aby wyeliminować występujące ostrzeżenia, należy zmniejszyć sprawność wskazanego w ostrzeżeniu silnika (**Motor – Comp 29**) z wartości 0,95 do 0,9 w polu *Electrical efficiency*. Należy także zmienić typ wymiennika ciepła wskazanego w ostrzeżeniu (**Aftercooler – Comp 27**) na *General heat exchanger* (w polu *Type of heat exchanger)*.
7. Zapisać plik pod nazwą *Blok_parametry_nadkrytyczne_wyniki.ebs.*



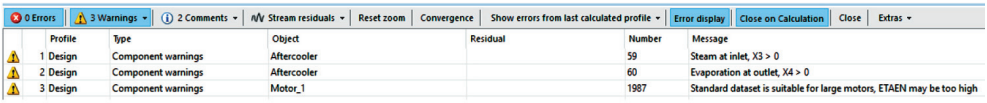
Rys. 56. Komponent skraplacza – wybór opcji przeprowadzania obliczeń



Rys. 57. Komponent turbiny – wybór opcji przeprowadzania obliczeń



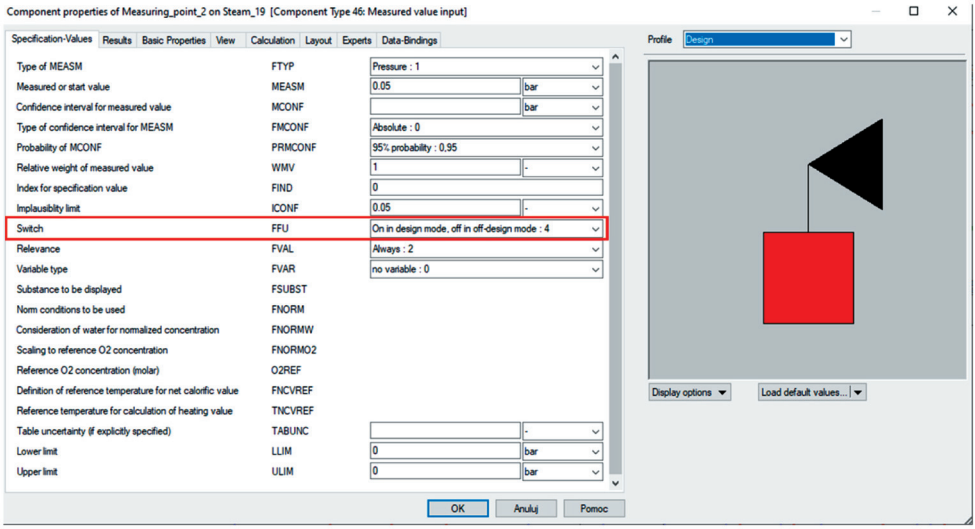
Rys. 58. Wizualizacja wyników obliczeń bloku na parametry nadkrytyczne



Rys. 59. Podsumowanie przeprowadzonej symulacji i ostrzeżenia dotyczące modelu

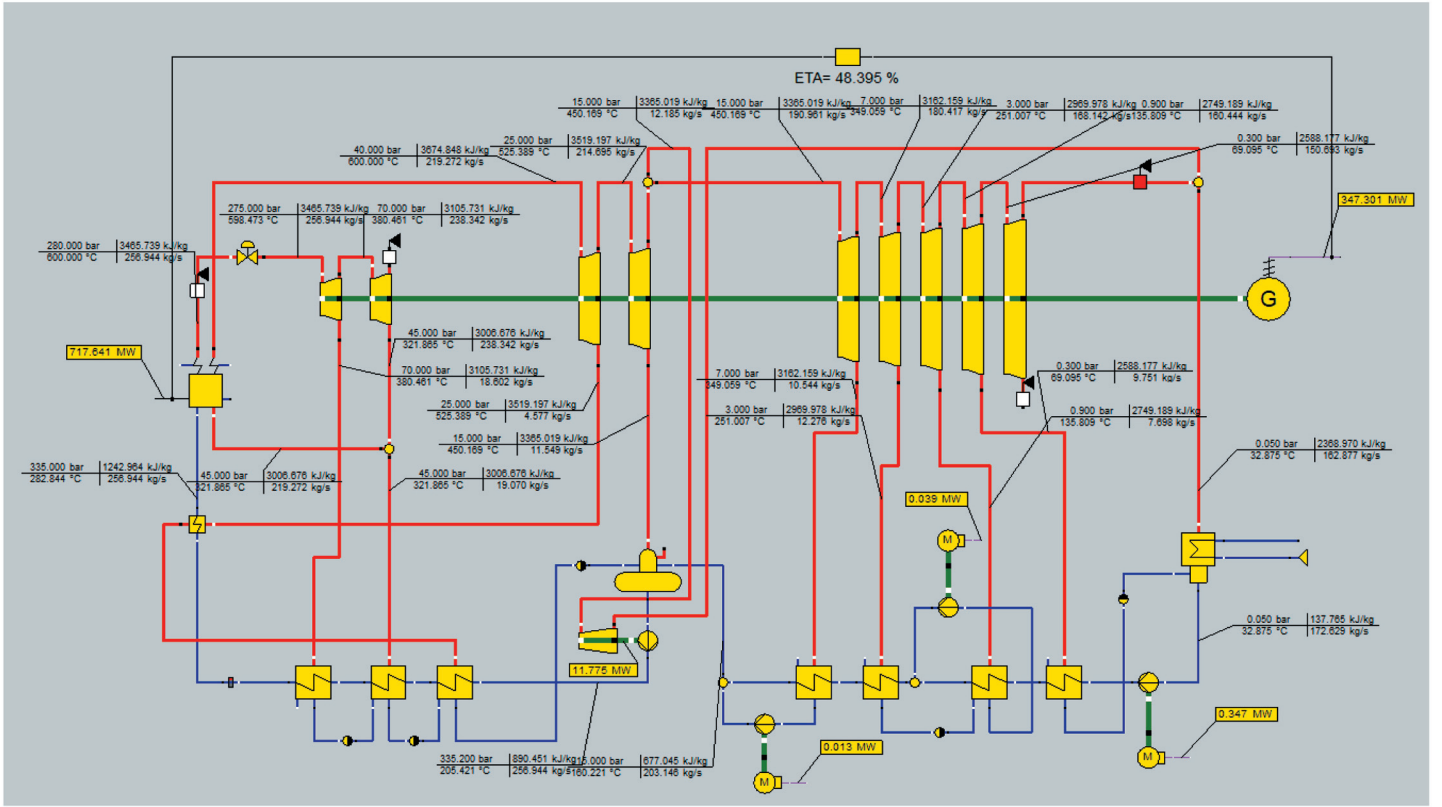
Zadanie dodatkowe

1. Utworzyć nowe profile obliczeniowe do wykonania obliczeń w warunkach obciążenia innego niż znamionowe. W profilach *off-desing* należy zdefiniować ilość przepływającej pary na poziomie 90% (*LOAD_90*), 80% (*LOAD_80*) i 70% (*LOAD_70*) nominalnej wydajności kotła równej 925 t/h. Wartość przepływu pary świeżej wprowadzić w komponencie **Measuring point** (**Comp 46**) na linii łączącej wylot z kotła z wlotem do turbiny.
2. W komponencie **Measuring point** (**Comp 46**), w którym definiuje się ciśnienie pary doprowadzanej do skraplacza, w polu *Switch* należy ustawić opcję *On in design mode, off in off-design mode : 4* (rys. 60).



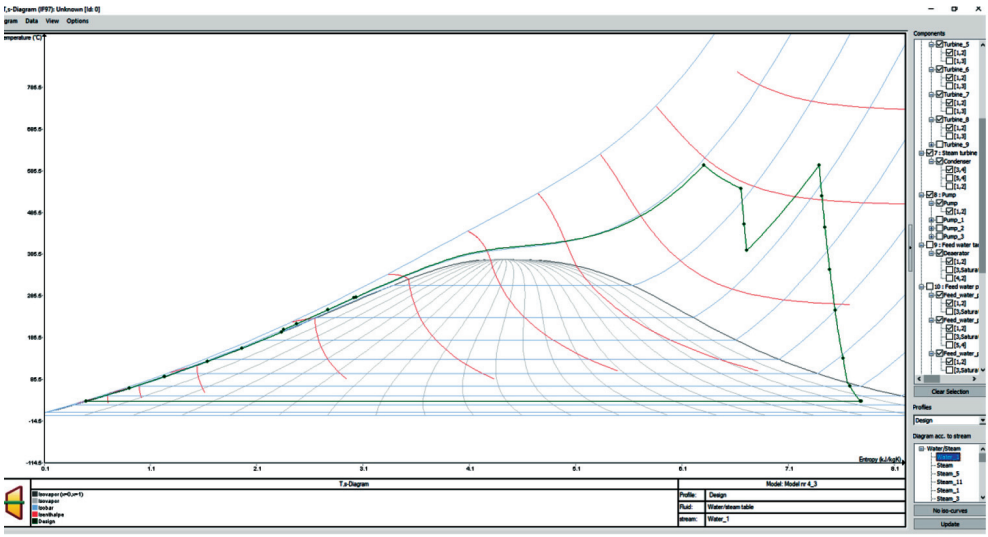
Rys. 60. Sposób definiowania wartości ciśnienia dla trybów *design* i *off-design*

3. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych (*Design*, *Off-Design*: *LOAD_90*, *LOAD_80* oraz *LOAD_70*), a wyniki dla poszczególnych wariantów wyeksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*).
4. Obliczyć sprawność energetyczną obiegu dla wszystkich analizowanych profili pracy z wykorzystaniem komponentu **Cycle efficiency meter** (**Comp 32**) i przedstawić w modelu jak na rysunku 61.



Rys. 61. Wizualizacja wyników oraz sprawności bloku po zakończeniu obliczeń

5. Przedstawić wyniki na wykresie we współrzędnych *T-s* temperatura–entropia (rys. 62). Zapisać plik pod nazwą *Blok_Parametry_Nadkrytyczne_zadanie_dodatkowe.ebs.*



Rys. 62. Wyniki obliczeń parametrów pracy bloku
na parametry nadkrytyczne przedstawione na wykresie T-s

Podsumowanie

Wykonanie ćwiczenia pozwoliło opracować model termodynamiczny bloku energetycznego na parametry nadkrytyczne oraz przeprowadzić obliczenia. Analiza pracy układu została wykonana dla wydajności nominalnej oraz trzech częściowych obciążeń kotła. W trakcie ćwiczenia przedstawione zostały wszystkie komponenty niezbędne do modelowania pracy bloków energetycznych, jak również metodyka definiowania danych wejściowych i wizualizacji wyników.

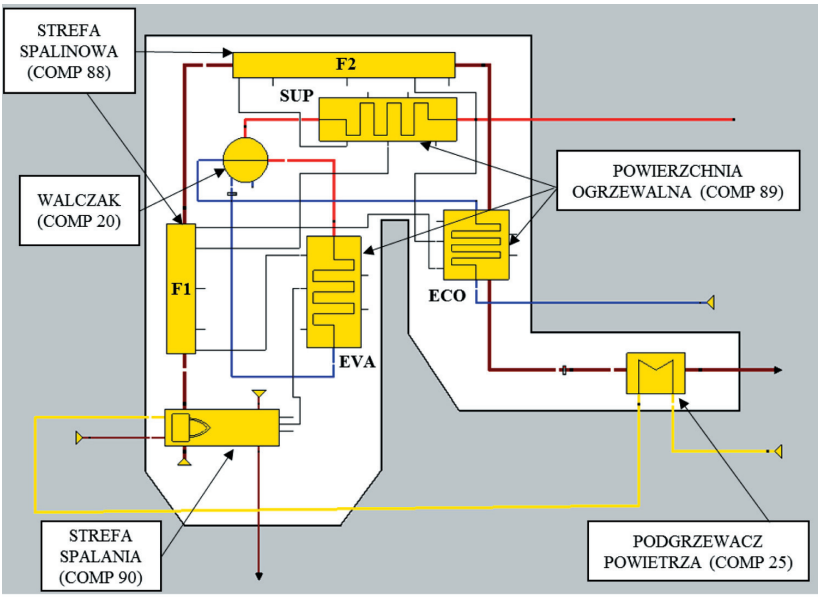
Ćwiczenie 6
Model kotła pyłowego

Cel ćwiczenia

Opracowanie modelu kotła pyłowego jednowalczakowego z naturalnym obiegiem, w którym spalany jest węgiel kamienny. Przeprowadzenie obliczeń mających na celu określenie wielkości mocy użytecznej kotła oraz jego sprawności energetycznej. Do realizacji tego zadania wymagany jest dostęp do komponentów wchodzących w skład modułu EbsBoiler.

Opis zadań do wykonania

Przygotować model kotła pyłowego zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 63. Model składać się będzie z następujących komponentów: komora spalania, podgrzewacz wody, parownik, walczak, przegrzewacz pary, strefa spalania oraz podgrzewacz powietrza. W celu przeprowadzenia obliczeń wykorzystać dane wejściowe (tab. 6).



Rys. 63. Model kotła pyłowego wykonany z wykorzystaniem komponentów EbsBoiler

Tabela 6

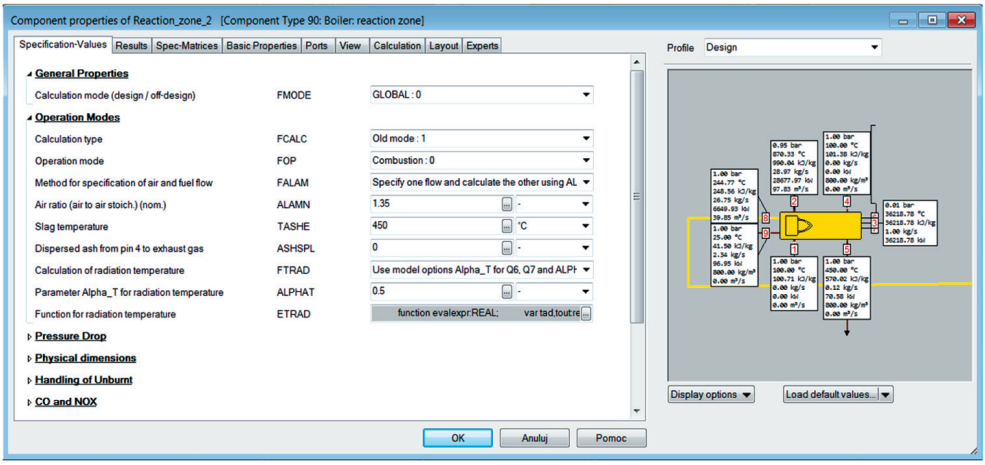
Dane wejściowe do modelu kotła pyłowego

Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura pary świeżej	350	°C	46
Temperatura wody zasilającej	150	°C	46
Ciśnienie wody zasilającej	50	bar	46
Przepływ wody zasilającej	80	t/h	46
Temperatura spalin przed podgrzewaczem powietrza	350	°C	46
Temperatura spalin za podgrzewaczem powietrza	160	°C	46
Temperatura powietrza	25	°C	1
Ciśnienie powietrza	1	bar	1
Ilość wody cyrkulującej w układzie parownika	200	t/h	46

Instrukcja wykonania modelu

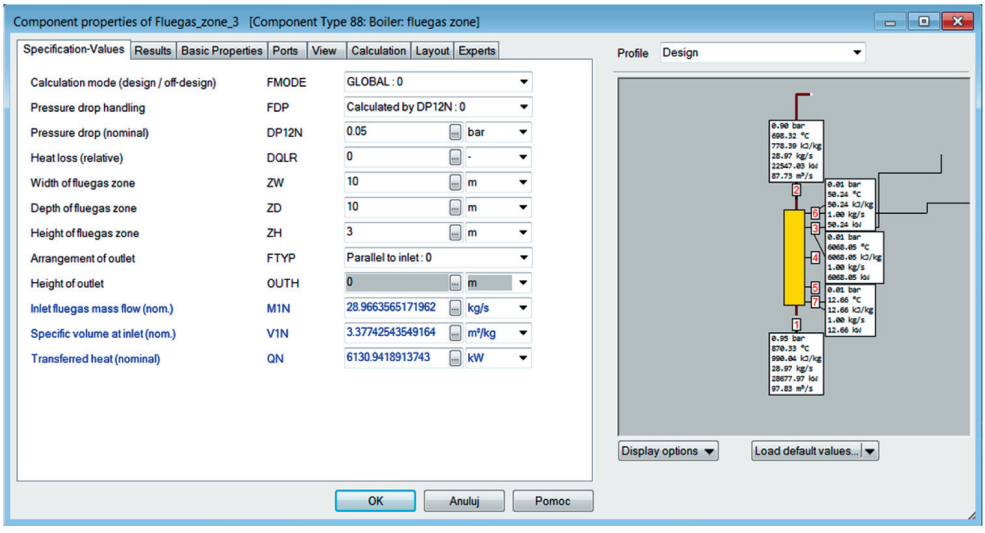
1. Otworzyć program Ebsilon®Professional i zapisać plik pod nową nazwą *Kociol_Pylowy_model.ebs.*
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy następujące komponenty:
   – strefa spalania (**Boiler: reaction zone – Comp 90**),
   – strefa spalinowa (**Boiler: fluegas zone – Comp 88**),
   – powierzchnia ogrzewalna (**Boiler: bundle heating surface – Comp 89**),
   – walczak (**Drum – Comp 20**),
   – podgrzewacz powietrza (**Air preheater – Comp 25**).
3. Przygotować model układu kotła pyłowego i odpowiednio połączyć komponenty zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 63. Wymienniki ciepła w kotle (parwonik – EVA, podgrzewacz wody – ECO oraz przegrzewacz – SUP) zostaną zamodelowane z wykorzystaniem tego samego komponentu (**Comp 89**), a różnice w ich budowie i parametrach pracy zostaną zdefiniowane wewnątrz komponentu.
4. Wprowadzić dane wejściowe zgodnie z zestawieniem (tab. 6) oraz uzupełnić strukturę modelu o dodatkowe komponenty umożliwiające definiowanie danych wejściowych. Przed wprowadzeniem danych do modelu należy przejść do zakładki *Extras → Model Options → Thermal Properties* i w polu *NCV reference temperature* wprowadzić wartość 25°C.
5. W komponencie strefy spalania (**Comp 90**) należy ustawić następujące opcje: *Calculation type (FCALC) → Old mode : 1*, *Operation mode (FOP) → Combustion : 0* oraz *Method for Specification of air and fuel flow (FALAM) → Specify one flow and calculate the other using ALAMN : 0*. Dodatkowo wprowadzić wartość parametru *Air ratio (air to air stoich.) (nom)* równą 1,35 oraz 450°C w polu *Slag temperature (TASHE)*. W punktach połączeniowych nr 1 (*Fluegas inlet*) oraz nr 4 (*Ash inlet*) należy umieścić komponent **Boundary input value** (**Comp 1**) i wprowadzić następujące wartości: *Pressure* = 1,0 bar, *Temperature* = 100°C oraz *Mass flow* = 0 kg/s. Wielkości te nie biorą udziału w obliczeniach, jednak ich zdefiniowanie jest konieczne do poprawnego działania modelu. W komponencie **Boundary input value** (**Comp 1**) umieszczonym w punkcie nr 9 (*Fuel inlet*) należy wprowadzić wartości *Pressure* = 1,0 bar, *Temperature* = 25°C, *Mass flow* = 100 t/h oraz następujące ustawienia i skład paliwa węglowego (zakładka *Material Fraction*):
   – *Set fluid complete (compostition, coefficients and heating value) : 1*,
   – *Composition defined by : Raw*,
   – *Elemental carbon (C)* = 0,6326, *Elemental hydrogen (H)* = 0,0367, *Elemental oxygen (O)* = 0,0248, *Elemental nitrogen (N)* = 0,0119, *Elemental sulphur (S)* = 0,0110, *Ash (unburnable solid)* = 0,0530, *Water in fuel (H2OB)* = 0,2300.

   Po wprowadzeniu składu paliwa węglowego nacisnąć na przycisk *Update now* w obszarze *Update input fields now?* Pozostałe ustawienia obliczeniowe pozostawić tak jak na rysunku 64.



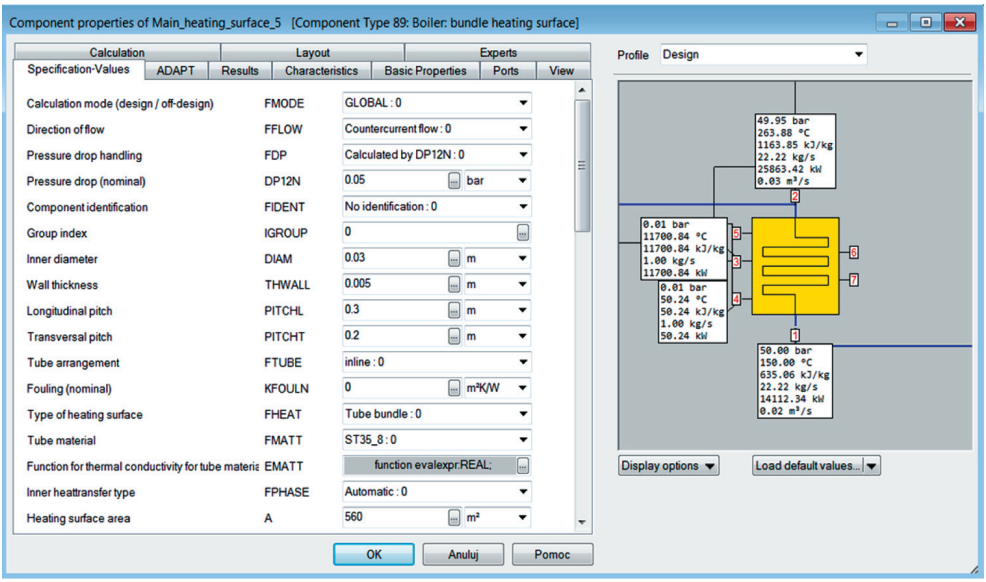
Rys. 64. Komponent strefy spalania uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

6. W komponencie strefy spalinowej (**Comp 88**) należy ustawić wartość parametru *Pressure drop handling (FDP)* na *Calculated by DP12N : 0*, *Pressure drop (nominal) (DP12N)* równą 0,05 bar oraz *Arrangement of outlet (FTYP)* na *Parallel to inlet : 0*. Dla parametrów *Width (ZW)*, *Depth (ZD)* oraz *Height of fluegas zone (ZH)* wprowadzić odpowiednio 10 m, 10 m i 3 m. Przedstawione ustawienia zastosować dla obu komponentów strefy spalinowej (**F1** i **F2**). Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 65.



Rys. 65. Komponent strefy spalinowej uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

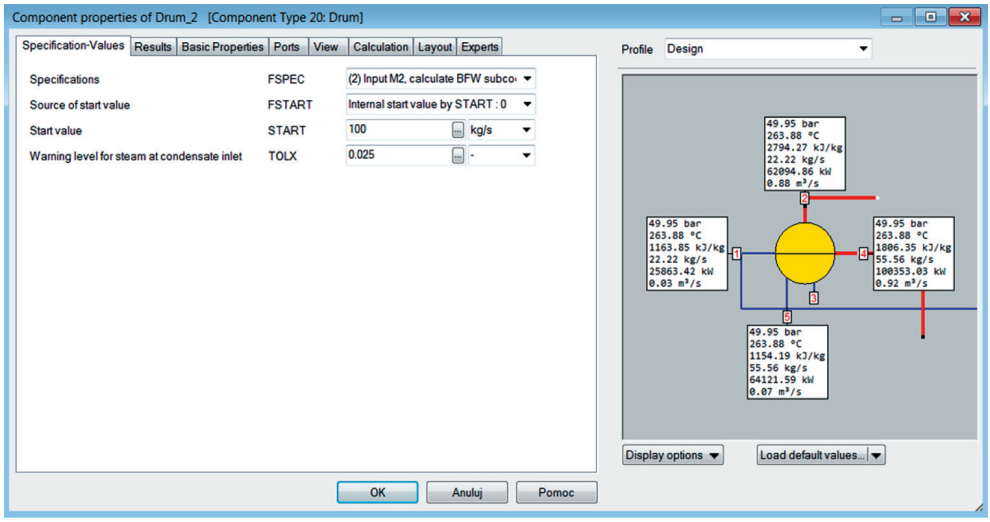
7. W komponencie podgrzewacza wody (**Comp 89**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Direction of flow (FFLOW)* → *Countercurrent flow : 0*, *Pressure drop handling (FDP)* → *Calculated by DP12N : 0* oraz wartość parametru *Pressure drop (nominal) (DP12N)* równą 0,05 bar. Dla parametru *Heating surface area (A)* wprowadzić wartość 560,0 m^2. Pozostałe parametry i ustawienia jak na rysunku 66.



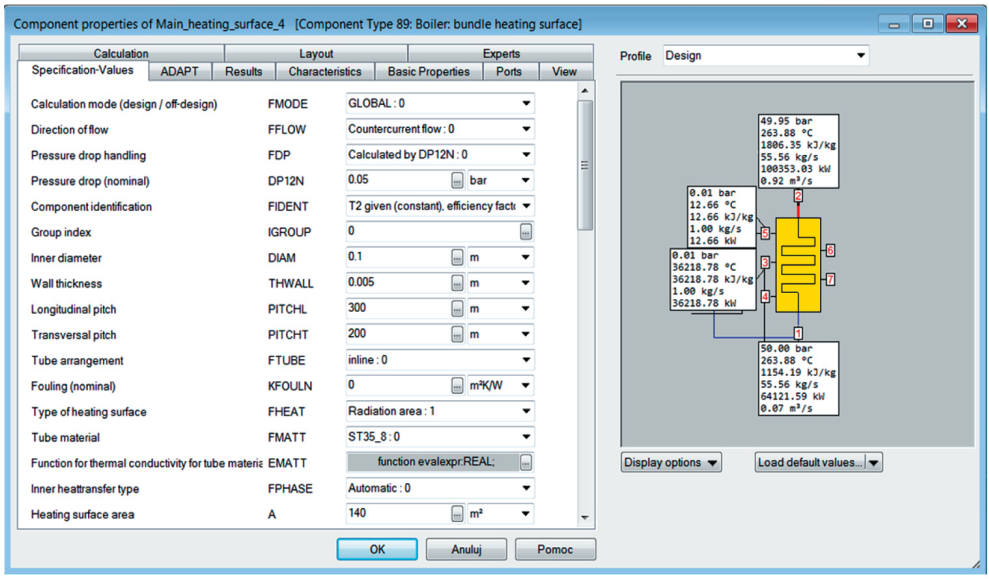
Rys. 66. Komponent podgrzewacza wody (ECO) uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

8. W komponencie walczaka (**Comp 20**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Specifications (FSPEC)* → *(2) Input M2, calculate BFW subcooling : 1* oraz *Source of start value (FSTART)* → *Internal start value by START : 0*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 67. Na linii wody wychodzącej z walczaka i trafiającej do parownika należy wprowadzić separator logiczny **Separator (logical)** (**Comp 80**) oraz ustawić parametr *Type of separation (FSPEC)* na *Pressure (voltage) : 1*.
9. W komponencie parownika (**Comp 89**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Direction of flow (FFLOW)* → *Countercurrent flow : 0*, *Pressure drop handling (FDP)* → *Calculated by DP12N : 0*, wartość parametru *Pressure drop (nominal) (DP12N)* równą 0,05 bar oraz *Component identification (FIDENT)* → *T2 given*

(constant), efficiency factor calculated : 1. Dla parametru *Heating surface area (A)* wprowadzić wartość 140,0 m^2. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 68.

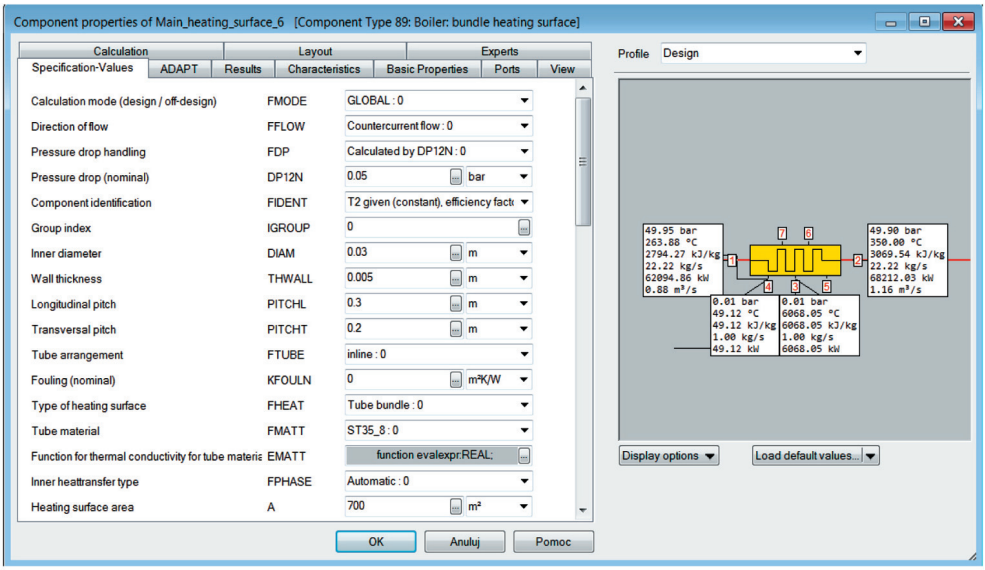


Rys. 67. Komponent walczaka uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



Rys. 68. Komponent parownika (EVA) uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

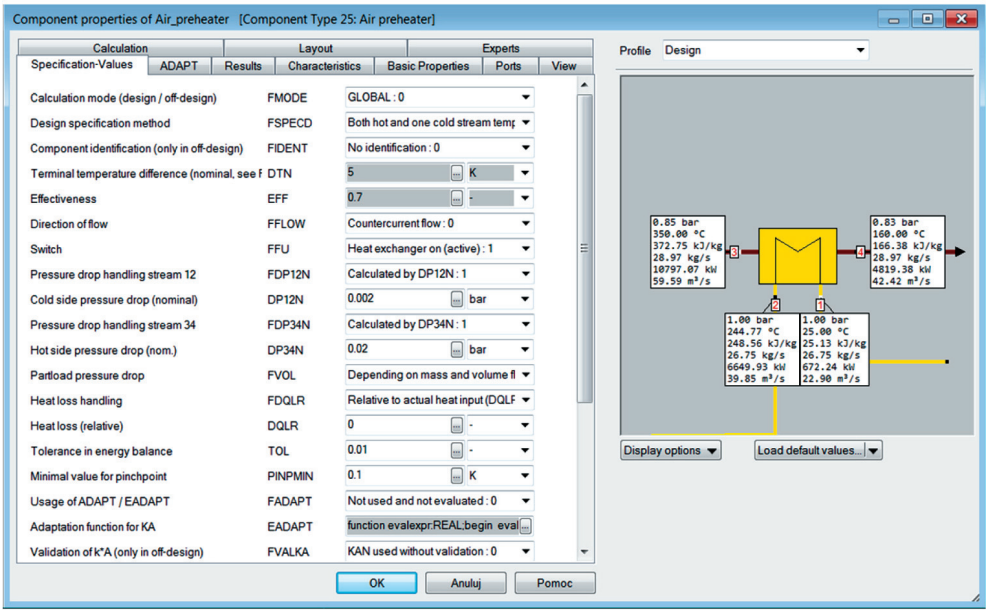
10. W komponencie przegrzewacza pary (**Comp 89**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Direction of flow (FFLOW)* → *Countercurrent flow : 0*, *Pressure drop handling (FDP)* → *Calculated by DP12N : 0*, wartość parametru *Pressure drop (nominal) (DP12N)* równą 0,05 bar oraz *Component identification (FIDENT)* → *T2 given (constant), efficiency factor calculated : 1*. Dla parametru *Heating surface area (A)* wprowadzić wartość 700,0 m^2. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 69.



Rys. 69. Komponent przegrzewacza pary (SUP) uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

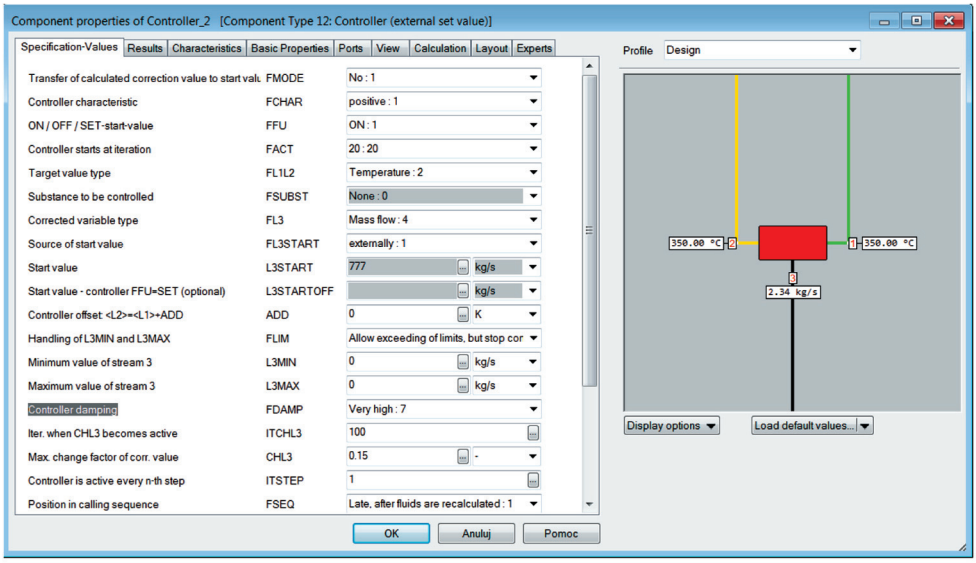
11. W komponencie podgrzewacza powietrza (**Comp 25**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Design specification method (FSPECD)* → *Both hot and one cold stream temperatures given : 4*, *Direction of flow (FFLOW)* → *Countercurrent flow : 0*, *Pressure drop handling stream 12 (FDP12N)* → *Calculated by DP12N : 1*, wartość pa-rametru *Cold side pressure drop (nominal) (DP12N)* równą 0,002 bar, *Pressure drop handling stream 34 (FDP34N)* → *Calculated by DP12N : 1* oraz wartość parametru *Hot side pressure drop (nom.) (DP34N)* równą 0,02 bar. Na linii spalin dolotowych do podgrzewacza powietrza należy wprowadzić separator logiczny **Separator (logical) (Comp 80)** oraz ustawić parametr *Type of separation (FSPEC)* na *Enthalpy (power) : 2*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 70.

12. Komponenty strefy spalania, stref spalinowych oraz powierzchni ogrzewalnych należy połączyć ze sobą, odpowiednio wykorzystując linie logiczne według następującego schematu:
   - strefa spalania: punkt połączeniowy nr 3 (*Connection point 3 [Outlet]*) → parownik (EVA): punkt połączeniowy nr 3 (*Connection point 3 [Inlet]*),
   - strefa spalinowa F1: punkt połączeniowy nr 7 (*Connection point 7 [Outlet]*) → parownik (EVA): punkt połączeniowy nr 5 (*Connection point 5 [Inlet]*),
   - strefa spalinowa F1: punkt połączeniowy nr 3 (*Connection point 3 [Outlet]*) → przegrzewacz pary (SUP): punkt połączeniowy nr 3 (*Connection point 3 [Inlet]*),
   - strefa spalinowa F1: punkt połączeniowy nr 6 (*Connection point 6 [Outlet]*) → podgrzewacz wody (ECO): punkt połączeniowy nr 4 (*Connection point 4 [Inlet]*),
   - strefa spalinowa F2: punkt połączeniowy nr 7 (*Connection point 7 [Outlet]*) → przegrzewacz pary (SUP): punkt połączeniowy nr 4 (*Connection point 4 [Inlet]*),
   - strefa spalinowa F2: punkt połączeniowy nr 3 (*Connection point 3 [Outlet]*) → podgrzewacz wody (ECO): punkt połączeniowy nr 3 (*Connection point 3 [Inlet]*).



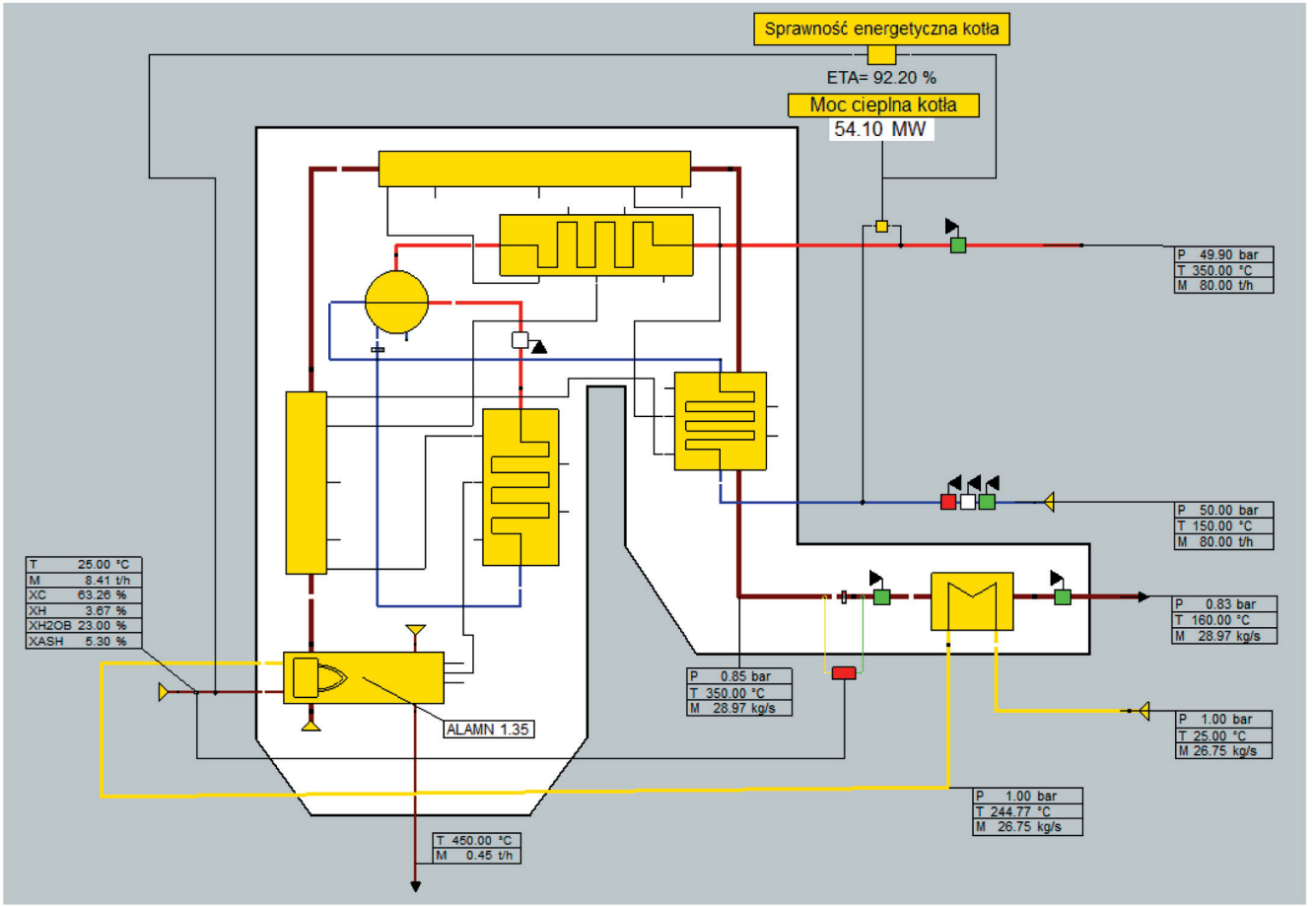
Rys. 70. Komponent podgrzewacza powietrza uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

13. Do struktury modelu należy wprowadzić dodatkowy komponent **Controller (external set value) (Comp 12)**. Jego zadaniem będzie dotrzymanie wymaganej temperatury spalin na wylocie z kotła przed podgrzewaczem powietrza poprzez regulację przepływu masowego węgla do spalania. W tym celu należy zaznaczyć następujące ustawienia: *Controller characteristic (FCHAR)* → *Positive : 1*, *Target value type (FL1L2)* → *Temperature : 2*, *Corrected variable type (FL3)* → *Mass flow : 4* oraz *Source of start value* → *externally : 1*. Dodatkowo ustawić parametr *Controller damping (FDAMP)* na wartość *Very high : 7*. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 71.



Rys. 71. Komponent kontrolera temperatury spalin uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

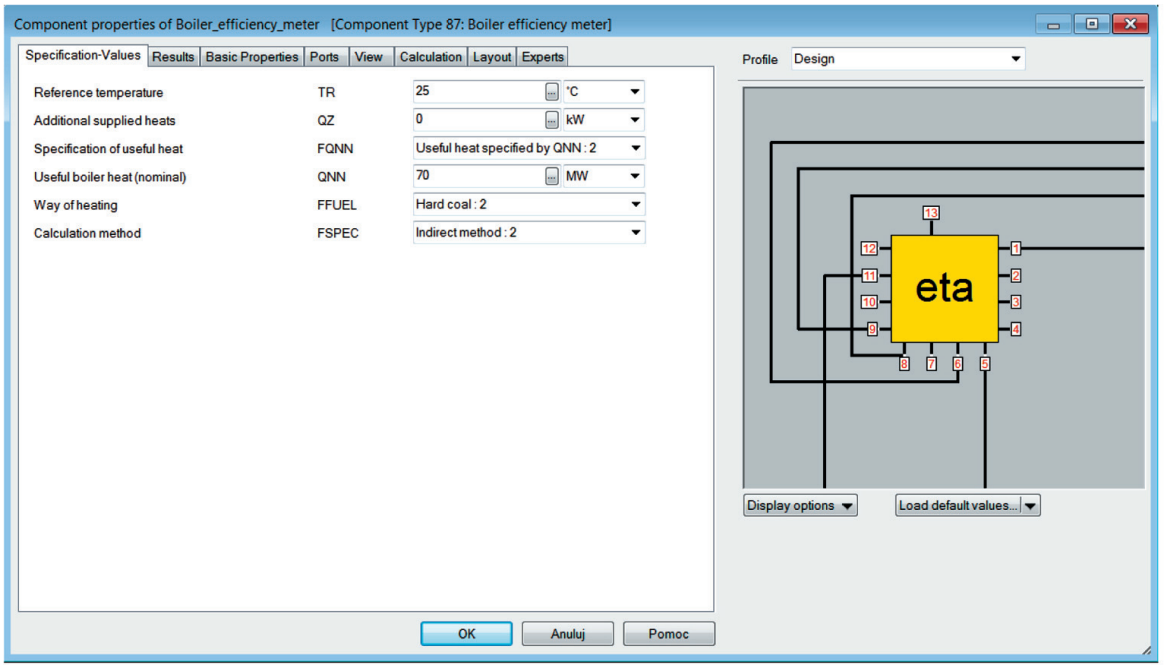
14. Zapisać plik pod nową nazwą *Kociol_Pylowy_model.ebs.*
15. Przeprowadzić obliczenia (przycisk *Simulation* lub klawisz F9) i uzupełnić model o elementy pozwalające na prezentację wybranych parametrów (opcja *Insert value-cross*). Wyświetlić uzyskaną moc cieplną kotła za pomocą komponentu **Difference meter** (**Comp 30**), zużycie paliwa węglowego oraz wartości temperatury, ciśnienia, entalpi oraz przepływu masowego w charakterystycznych punktach obiegu zgodnie z rysunkiem 72. Dodatkowo wyznaczyć sprawność energetyczną kotła, wykorzystując komponent **Cycle efficiency meter** (**Comp 32**).
16. Zapisać plik pod nazwą *Kociol_Pylowy_wyniki.ebs*, a wyniki obliczeń eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*).



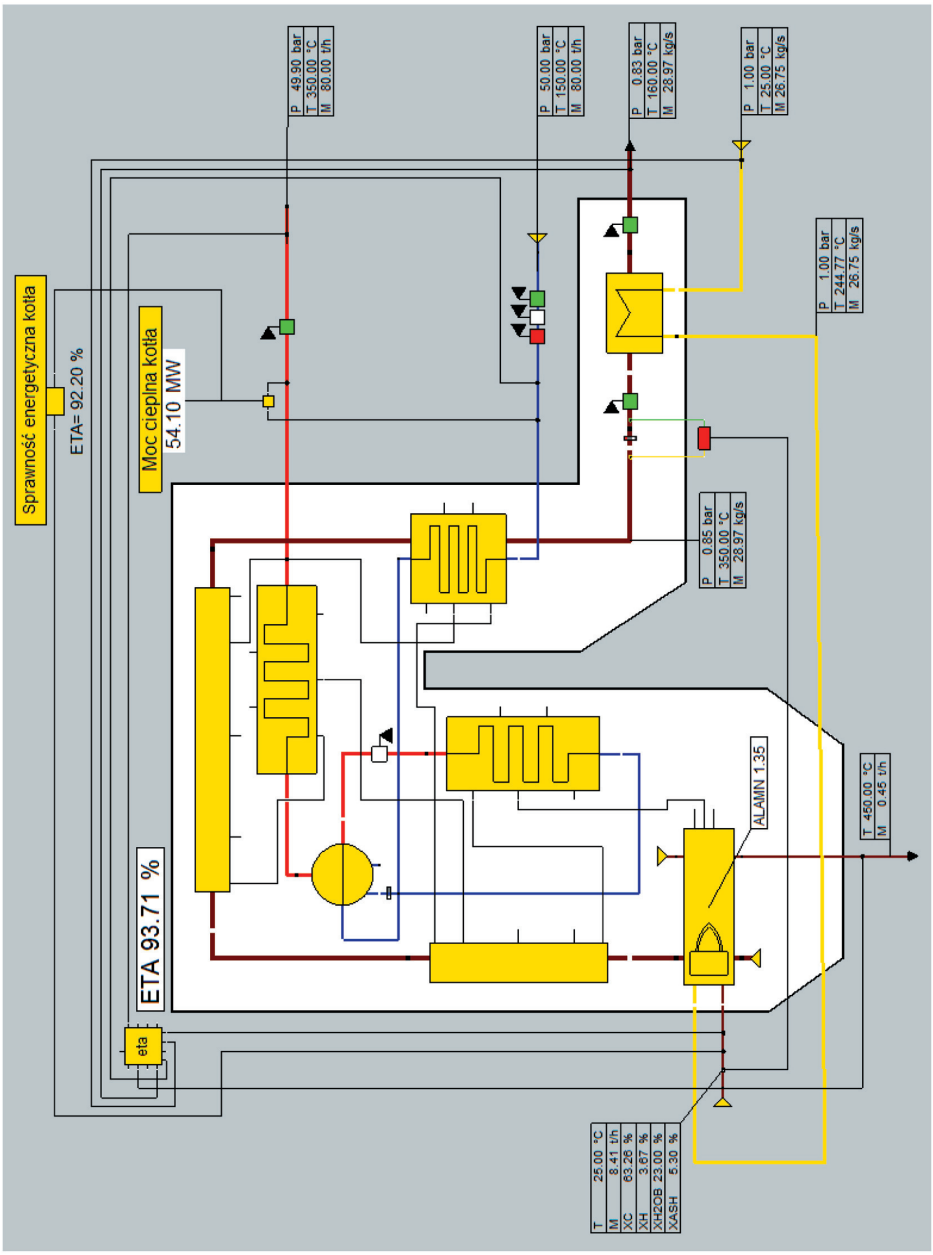
Rys. 72. Model kotła pyłowego z wynikami obliczeń symulacyjnych dla danych wejściowych

Zadanie dodatkowe

1. Wykorzystując plik *Kociol_pylowy_model.ebs*, należy rozbudować model kotła pyłowego o dodatkowy komponent przeznaczony do obliczeń sprawności energetycznej kotłów metodą bezpośrednią oraz pośrednią, czyli komponent **Boiler efficiency meter** (**Comp 87**). W obliczeniach sprawności energetycznej kotła z wykorzystaniem tego komponentu poza mocą cieplną kotła oraz strumieniem energii chemicznej paliwa uwzględnione są pozostałe strumienie czynników przecinających osłonę bilansową kotła: spaliny wylotowe, powietrze do spalania oraz żużel. Na tej podstawie w metodzie pośredniej określane są poszczególne składowe strat energii z kotła. W ustawieniach komponentu należy wprowadzić następujące parametry: *Reference temperature (TR)* → 25°C, *Specification of useful heat (QNN)* → 70,0 MW, *Way of heating (FFUEL)* → *Hard coal : 2* oraz *Calculation method (FSPEC)* → *Direct method : 1* lub *Indirect method : 2* (w zależności od założonej metody wyznaczania sprawności energetycznej kotła) (rys. 73). Połączenia z komponentem 87 wprowadzić zgodnie z rysunkiem 74.
2. Komponent sprawności energetycznej kotła należy połączyć odpowiednio z wybranymi punktami, wykorzystując linie logiczne według następującego schematu:
   – *Useful heat of steam generator (including injection)*: punkt połączeniowy nr 1 (*Connection point 1 [Inlet]*) → para świeża (za przegrzewaczem pary SUP),
   – *Heat supply of fuel (including NCV)*: punkt połączeniowy nr 5 (*Connection point 5 [Inlet]*) → linia węgla do strefy spalania,
   – *Heat supply of air*: punkt połączeniowy nr 6 (*Connection point 6 [Inlet]*) → linia powietrza (przed podgrzewaczem powietrza),
   – *Heat supply of air*: punkt połączeniowy nr 6 (*Connection point 6 [Inlet]*) → linia powietrza (przed podgrzewaczem powietrza),
   – *Other energy streams supplied*: punkt połączeniowy nr 8 (*Connection point 8 [Inlet]*) → linia wody zasilającej (przed podgrzewaczem wody),
   – *Flue gas outlet I (latent heat CO-, S-, F- losses*): punkt połączeniowy nr 9 (*Connection point 9 [Inlet]*) → linia spalin (za podgrzewaczem powietrza),
   – *Slag outlet III*: punkt połączeniowy nr 11 (*Connection point 11 [Inlet]*) → linia żużla.
3. Przeprowadzić obliczenia, a wyniki eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*). Na podstawie uzyskanych rezultatów określić przyczyny różnic pomiędzy uzyskiwanymi wynikami obliczeń sprawności energetycznej kotła z wykorzystaniem przedstawionych w zadaniu metod. Uzyskane rezultaty obliczeń modelu kotła pyłowego porównać z wartościami na rysunku 74.
4. Zapisać plik pod nazwą *Kociol_Pylowy_zadanie dodatkowe.ebs*.



Rys. 73. Komponent sprawności energetycznej kotła uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



Rys. 74. Model kotła pyłowego z wynikami obliczeń symulacyjnych

Podsumowanie

Wykonanie ćwiczenia pozwoliło na opracowanie modelu kotła pyłowego zasilanego paliwem stałym, jakim może być węgiel kamienny. Użytkownik powinien opanować sposób działania komponentów pozwalających na budowę modelu kotła pyłowego z wykorzystaniem dodatku EbsBoiler. Dodatkowo przedstawiono różne sposoby określania sprawności energetycznej kotłów za pomocą dostępnych komponentów w programie Ebsilon®Professional.

Literatura

[3.1] Chmielniak T.: Technologie energetyczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.

[3.2] Chmielniak T., Ziębik A. (red.): Obiegi cieplne nadkrytycznych bloków węglowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.

[3.3] Kitto J., Stultz S. (eds.): Steam – its generation and use. The Babcock and Wilcox Company, Barberton, Ohio 2005.

[3.4] Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektrownie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2017.

[3.5] Paska J.: Wytwarzanie energii elektrycznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

[3.6] Chich W.: Thermodynamics and heat powered cycles. A cognitive engineering approach. Nova Science Publisher, New York 2007.

[3.7] Madejski J.: Termodynamika techniczna. Wydanie 4, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2000.

[3.8] Marecki J.: Podstawy przemian energetycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.

[3.9] Tokarz T.: Kontrola procesów cieplnych w siłowniach parowych. Część I. Podstawy analizy procesów konwersji energii. Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.

[3.10] Tokarz T.: Kontrola procesów cieplnych w siłowniach parowych. Część II. Bilansowanie bloków energetycznych, Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.

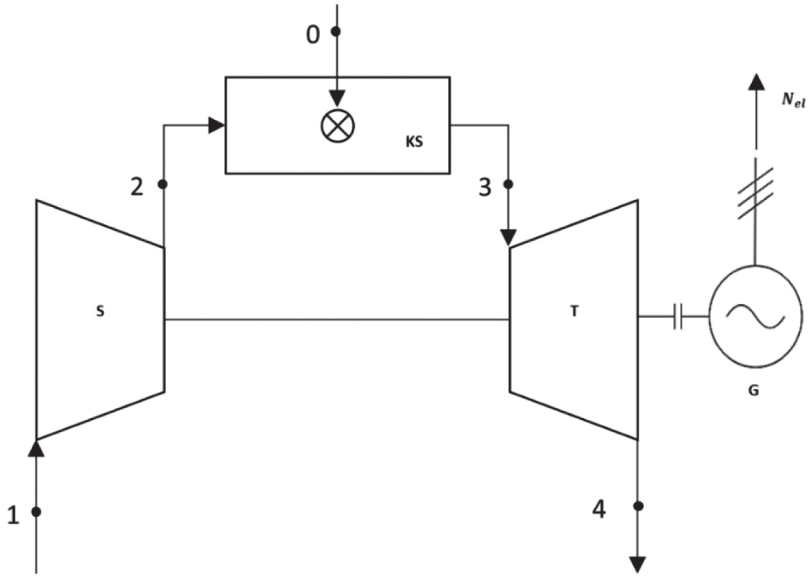
[3.11] Orłowski P.: Kotły parowe, konstrukcja i obliczenia. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1966.

[3.12] Singer J.G. (ed.): Combustion – fossil power. A reference book on fuel burning and steam generation. Combustion Engineering, Windsor 1991.

4. Elektrownie i elektrociepłownie gazowo-parowe

4.1. Wprowadzenie teoretyczne

Podstawowy obieg elektrowni gazowej składa się z połączonych ze sobą następujących elementów: sprężarka, komora spalania, turbina gazowa oraz generator elektryczny [4.1–4.3]. Schemat zespołu turbiny gazowej [4.4–4.6] pracującej w układzie otwartym został przedstawiony na rysunku 75. Zasada działania jest następująca. Powietrze atmosferyczne (1) dostarczane jest przez układ filtrów do sprężarki (S), gdzie ulega sprężeniu (2). Do sprężarki na wał napędowy doprowadzana jest moc użyteczna (N_{us}).



Rys. 75. Schemat zespołu turbiny gazowej

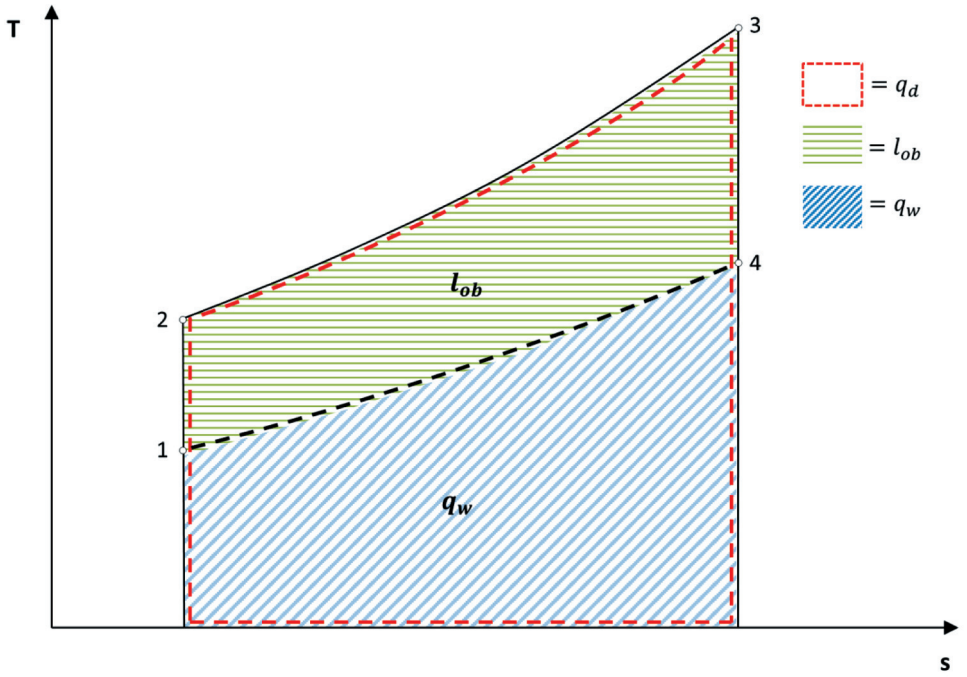
Sprężone powietrze kierowane jest do komory spalania (KS). Jednocześnie do komory spalania doprowadzane jest paliwo (gaz) i następuje spalenie mieszanki paliwowo-powietrznej. Powstałe spaliny (3) dostarczane są do turbiny gazowej (T), gdzie ulegają procesowi rozprężania i opuszczają układ elektrowni gazowej (4). Na skutek zacho-

dzącego w turbinie gazowej procesu ekspansji spalin na wał turbozespołu dostarczana jest moc użyteczna (N_{ut}). Uzyskiwana moc użyteczna elektrowni gazowej (N_u) jest różnicą pomiędzy mocą użyteczną (N_{ut}) dostarczaną na wał przez turbinę gazową a mocą użyteczną niezbędną do napędu sprężarki (N_{us}). Moc użyteczna (N_u) jest zamieniania w generatorze (G) na moc elektryczną (N_{el}).

4.1.1. Obieg porównawczy elektrowni gazowej

Model obiegu Joule'a (Joule'a–Braytona) jest obiegiem porównawczym wykorzystywanym do oceny jakości przemian zachodzących w rzeczywistym układzie elektrowni gazowej [4.7–4.9]. Składa się on z czterech przemian termodynamicznych czynnika obiegowego (gaz), które realizowane są w cyklu otwartym. Obieg porównawczy Joule'a został przedstawiony na płaszczyźnie wykresu T-s (temperatura–entropia) na rysunku 76. W obiegu tym możemy wyróżnić następujące przemiany:

1. sprężanie czynnika w sprężarce (przemiana izentropowa od pkt. 1 do pkt. 2),
2. spalanie mieszanki paliwowo-powietrznej (przemiana izobaryczna od pkt. 2 do pkt. 3),
3. rozprężanie czynnika w turbinie (przemiana izentropowa od pkt. 3 do pkt. 4),
4. wyprowadzenie ciepła z obiegu (umowna przemiana izobaryczna zachodząca w otoczeniu – od pkt. 4 do pkt. 1).



Rys. 76. Obieg teoretyczny Joule'a–Braytona w układzie T-s

Na wykresie T-s (rys. 76) ciepło doprowadzone do obiegu Joule'a $(\dot{Q}_d)$ zaznaczono jako obszar otoczony czerwoną przerywaną linią, natomiast ciepło wyprowadzone z obiegu $(\dot{Q}_w)$ jako kreskowane niebieskie pole. Praca obiegu (L_{ob}) jest zatem różnicą pomiędzy wartością ciepła doprowadzonego do obiegu i wartością ciepła wyprowadzonego z obiegu, co można zapisać wzorem:

$$L_{ob} = \dot{Q}_d - \dot{Q}_w \tag{4.1}$$

Przy założeniu, że w analizowanym obiegu masa czynnika obiegowego wynosi 1 kg, wzór na jednostkową pracę obiegu (l_{ob}) przyjmuje postać:

$$l_{ob} = q_d - q_w \tag{4.2}$$

Jednostkowa praca obiegu (l_{ob}) jest różnicą jednostkowej pracy turbiny (l_t) oraz sprężarki (l_s):

$$l_{ob} = l_t - l_s \tag{4.3}$$

Zgodnie z oznaczeniami na rysunku 76 można zapisać następujące zależności:

– jednostkowa praca turbiny:

$$l_t = i_3 - i_4 \tag{4.4}$$

gdzie:

i_3 – entalpia właściwa czynnika obiegowego przed turbiną, kJ/kg,
i_4 – entalpia właściwa czynnika obiegowego za turbiną, kJ/kg;

– jednostkowa praca sprężarki:

$$l_s = i_2 - i_1 \tag{4.5}$$

gdzie:

i_1 – entalpia właściwa czynnika obiegowego przed sprężarką, kJ/kg,
i_2 – entalpia właściwa czynnika obiegowego za sprężarką, kJ/kg;

– jednostkowe ciepło doprowadzone do obiegu:

$$q_d = i_3 - i_2 \tag{4.6}$$

gdzie:

i_2 – entalpia właściwa czynnika obiegowego przed komorą spalania, kJ/kg,
i_3 – entalpia właściwa czynnika obiegowego za komorą spalania, kJ/kg;

– jednostkowe ciepło wyprowadzone z obiegu:

$$q_w = i_4 - i_1 \tag{4.7}$$

Wykorzystując wzory (4.2)–(4.6), sprawność cieplną obiegu Joule'a można obliczyć następująco:

$$\eta_{e_{eg}} = \frac{l_t - l_s}{q_d} = \frac{(i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)}{i_3 - i_2} \tag{4.8}$$

Przekształcając licznik w równaniu (4.7), wzór na sprawność termiczną obiegu elektrowni gazowej można zapisać następująco:

$$\eta_{e_{eg}} = \frac{(i_3 - i_2) - (i_4 - i_1)}{i_3 - i_2} = 1 - \frac{i_4 - i_1}{i_3 - i_2} = 1 - \frac{q_w}{q_d} \tag{4.9}$$

4.1.2. Wskaźniki i parametry sprawnościowe wykorzystywane do oceny pracy elektrowni gazowej

Sprawność procesu wytwarzania energii elektrycznej określa jednocześnie sprawność energetyczną elektrowni gazowej, co można zapisać za pomocą następującego wzoru:

$$\eta_{e_{eg}} = \frac{N_{el}}{\dot{m}_{pal} \cdot W_d} \tag{4.10}$$

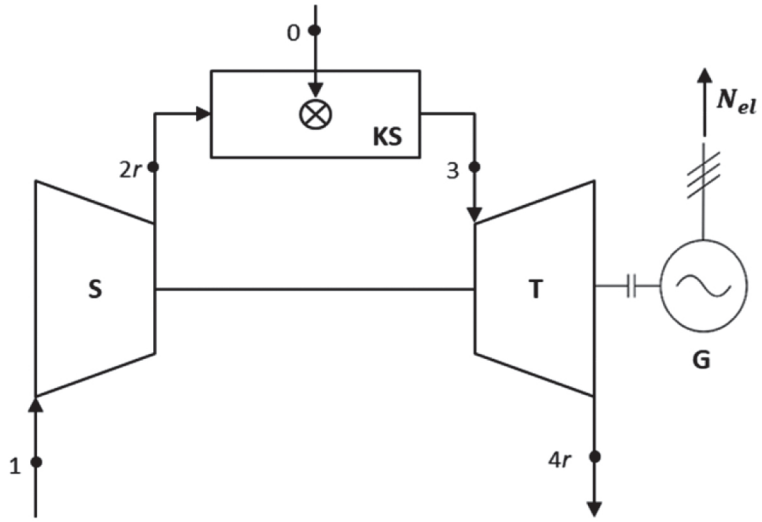
gdzie:

N_{el} – moc elektryczna na zaciskach generatora, kW,

$\dot{m}_{pal}$ – przepływ masowy paliwa gazowego do komory spalania, kg/s,

W_d – wartość opałowa paliwa gazowego, kJ/kg.

Schemat obiegu elektrowni gazowej z naniesionymi oznaczeniami dla rzeczywistych parametrów w charakterystycznych punktach obiegu został przedstawiony na rysunku 77. Indeks *r* dotyczy rzeczywistego parametru obiegu. Do najważniejszych różnic pomiędzy parametrami w wybranych punktach obiegu rzeczywistego, a porównawczego układu elektrowni gazowej należy zaliczyć: nieodwracalność procesów sprężania, rozprężania oraz spalania, a także straty ciśnienia związane z przepływem czynnika przez wybrane elementy układu turbozespołu gazowego.



Rys. 77. Schemat rzeczywistego obiegu Joule'a–Braytona

Poniżej przedstawiono podstawowe wskaźniki sprawnościowe dla wybranych elementów elektrowni gazowej:

– sprawność wewnętrzna sprężarki:

$$\eta_{i_s} = \frac{N_s}{N_{i_s}} = \frac{\dot{m}_s \cdot l_s}{\dot{m}_s \cdot l_{i_s}} = \frac{\dot{m}_s \cdot (i_2 - i_1)}{\dot{m}_s \cdot (i_{2r} - i_1)} = \frac{i_2 - i_1}{i_{2r} - i_1} \tag{4.11}$$

gdzie:

N_s – moc izentropowa sprężarki, kW,
N_{i_s} – moc wewnętrzna sprężarki, kW,
l_{i_s} – jednostkowa praca wewnętrzna sprężarki, kJ/kg,
$\dot{m}_s$ – strumień masowy czynnika przepływającego przez sprężarkę, kg/s;

– sprawność wewnętrzna turbiny:

$$\eta_{i_t} = \frac{N_{i_t}}{N_t} = \frac{\dot{m}_t \cdot l_{i_t}}{\dot{m}_t \cdot l_t} = \frac{\dot{m}_t \cdot (i_3 - i_{4r})}{\dot{m}_t \cdot (i_3 - i_4)} = \frac{i_3 - i_{4r}}{i_3 - i_4} \tag{4.12}$$

gdzie:

N_t – moc teoretyczna (przemiana izentropowa) turbiny, kW,
N_{i_t} – moc wewnętrzna turbiny, kW,
l_{it} – jednostkowa praca wewnętrzna turbiny, kJ/kg,
$\dot{m}_t$ – strumień masowy czynnika przepływającego przez turbinę, kg/s;

– sprawność komory spalania:

$$\eta_{e_{ks}} = \frac{\dot{Q}_d}{\dot{m}_{pal} \cdot W_d} \tag{4.13}$$

gdzie $\dot{Q}_d$ – moc cieplna dostarczona do obiegu, kW;

– sprawność mechaniczna turbiny:

$$\eta_{m_t} = \frac{N_{u_t}}{N_{i_t}} \tag{4.14}$$

– sprawność mechaniczna sprężarki:

$$\eta_{m_s} = \frac{N_{i_s}}{N_{u_s}} \tag{4.15}$$

– sprawność generatora:

$$\eta_g = \frac{N_{el}}{N_u} \tag{4.16}$$

4.2. Ćwiczenia praktyczne

Ćwiczenie 1
Model turbiny gazowej

Cel ćwiczenia

Zbudowanie modelu turbiny gazowej z podstawowych komponentów, takich jak sprężarka, komora spalania, turbina i generator. Zapoznanie się z komponentami pozwalającymi na symulację pracy turbiny gazowej oraz wyznaczenie podstawowych parametrów termodynamicznych obiegu. Obliczenie wskaźników sprawnościowych układu turbiny gazowej, a także poszczególnych elementów jego struktury.

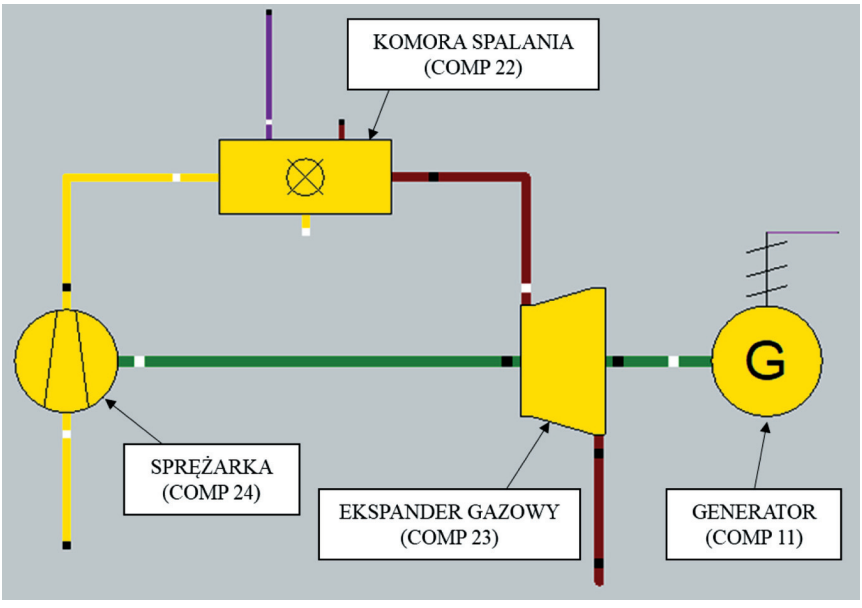
Opis zadań do wykonania

Na podstawie danych wejściowych (tab. 7) opracować model turbiny gazowej zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 78. Model powinien zawierać następujące komponenty: sprężarka, komora spalania, ekspander gazowy (turbina) oraz generator.

Tabela 7

Dane wejściowe do modelu turbiny gazowej

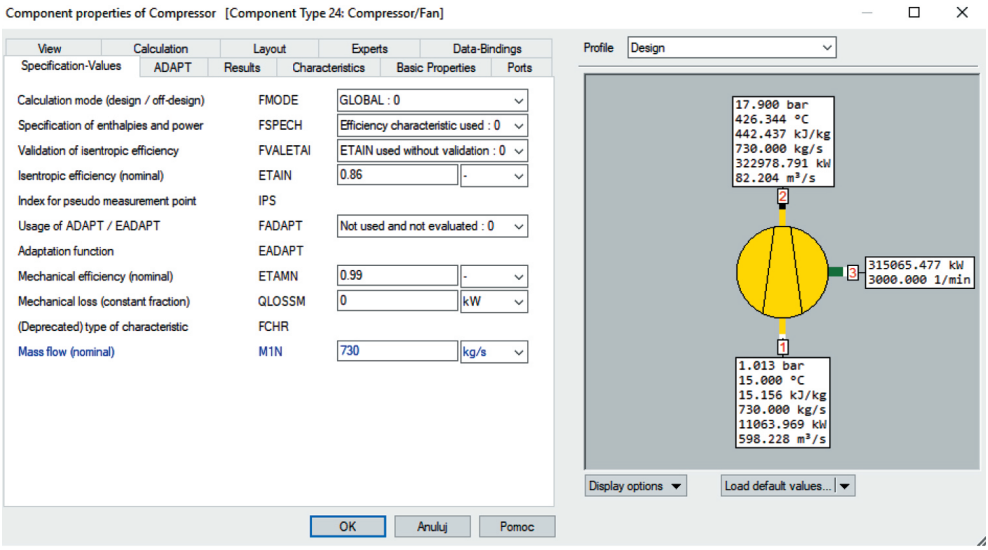
Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura powietrza na wlocie do sprężarki	15,00	°C	1
Ciśnienie powietrza na wlocie do sprężarki	1,01	bar	1
Przepływ masowy powietrza na wlocie do sprężarki	730,00	kg/s	46
Wilgotność względna powietrza na wlocie do sprężarki	60,00	%	46
Ciśnienie powietrza za sprężarką	17,90	bar	46
Temperatura gazu do komory spalania	15,00	°C	1
Przepływ masowy gazu do komory spalania	14,50	kg/s	1
Zawartość CH_4 w paliwie gazowym	100,00	%	1
Temperatura spalin na wylocie z turbiny gazowej	570,00	°C	46
Ciśnienie spalin na wylocie z turbiny gazowej	1,06	bar	46
Sprawność izentropowa sprężarki	86,00	%	24
Sprawność mechaniczna sprężarki oraz ekspandera gazowego	99,00	%	23, 24
Sprawność generatora	98,50	%	11



Rys. 78. Połączone komponenty tworzące model turbiny gazowej

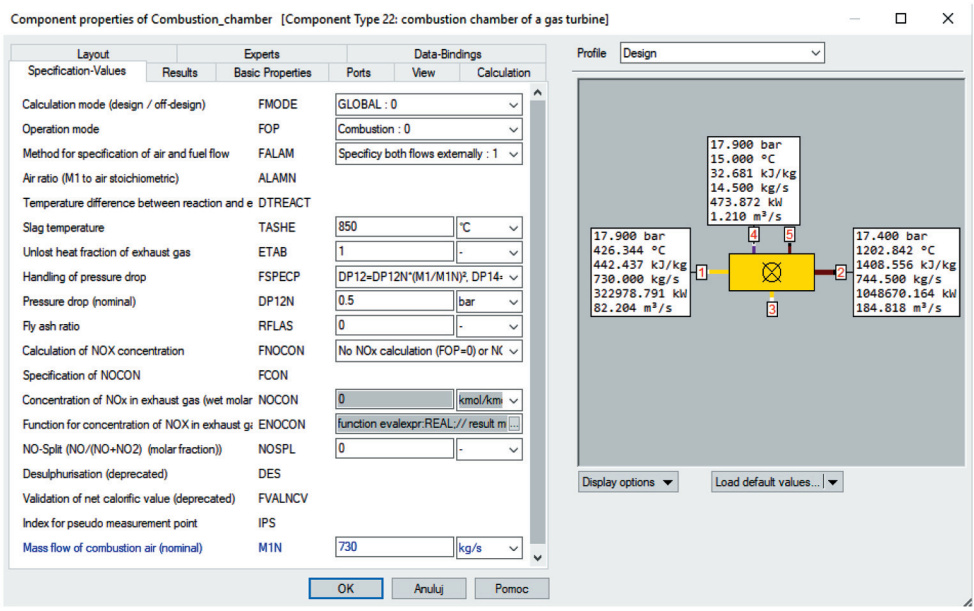
Instrukcja wykonania modelu

1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_ model.ebs*.
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy następujące komponenty:
   – sprężarka (**Compressor – Comp 24**),
   – komora spalania (**Combustion chamber – Comp 22**),
   – ekspander gazowy (**Gas expander – Comp 23**),
   – generator (**Generator – Comp 11**).
3. Połączyć wybrane komponenty zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 78.
4. Wprowadzić dane wejściowe zgodnie z zestawieniem przedstawionym w tabeli 7:
   a) Upewnić się, że ustawienia obliczeniowe w komponencie sprężarki (**Comp 24**) są takie same jak na rysunku 79.

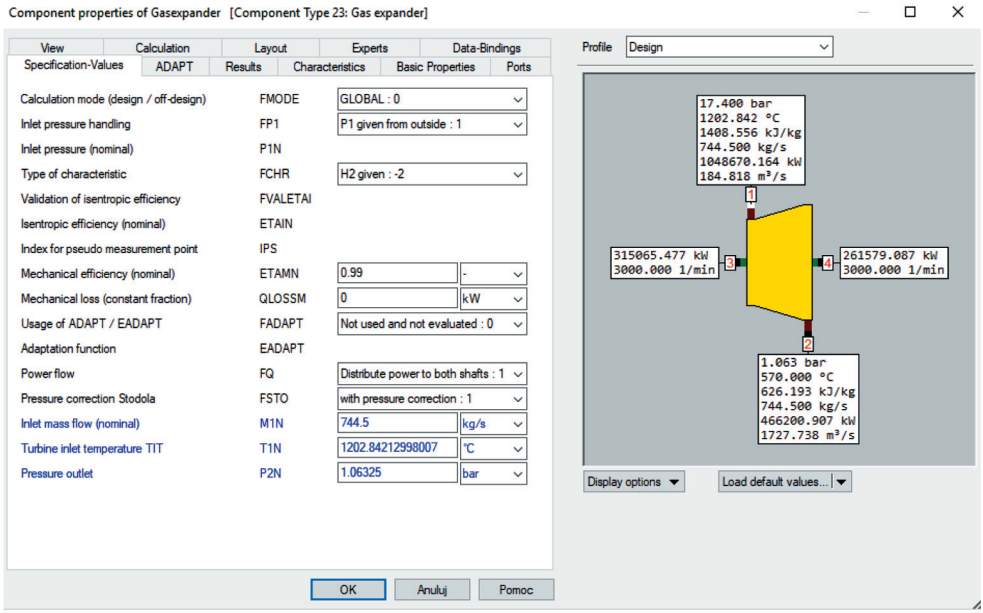


Rys. 79. Komponent sprężarki uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

   b) W komponencie komory spalania (**Comp 22**) należy ustawić wartość parametru *Method for specification of air and fuel flow (FALAM)* na *Specify both flows externally : 1*. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 80.
   c) W komponencie ekspandera gazowego (**Comp 23**) należy ustawić wartość parametru *Inlet pressure handling (FP1)* na *P1 Given from outside : 1* oraz *Type of characteristic na H2 given : –2*. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 81.



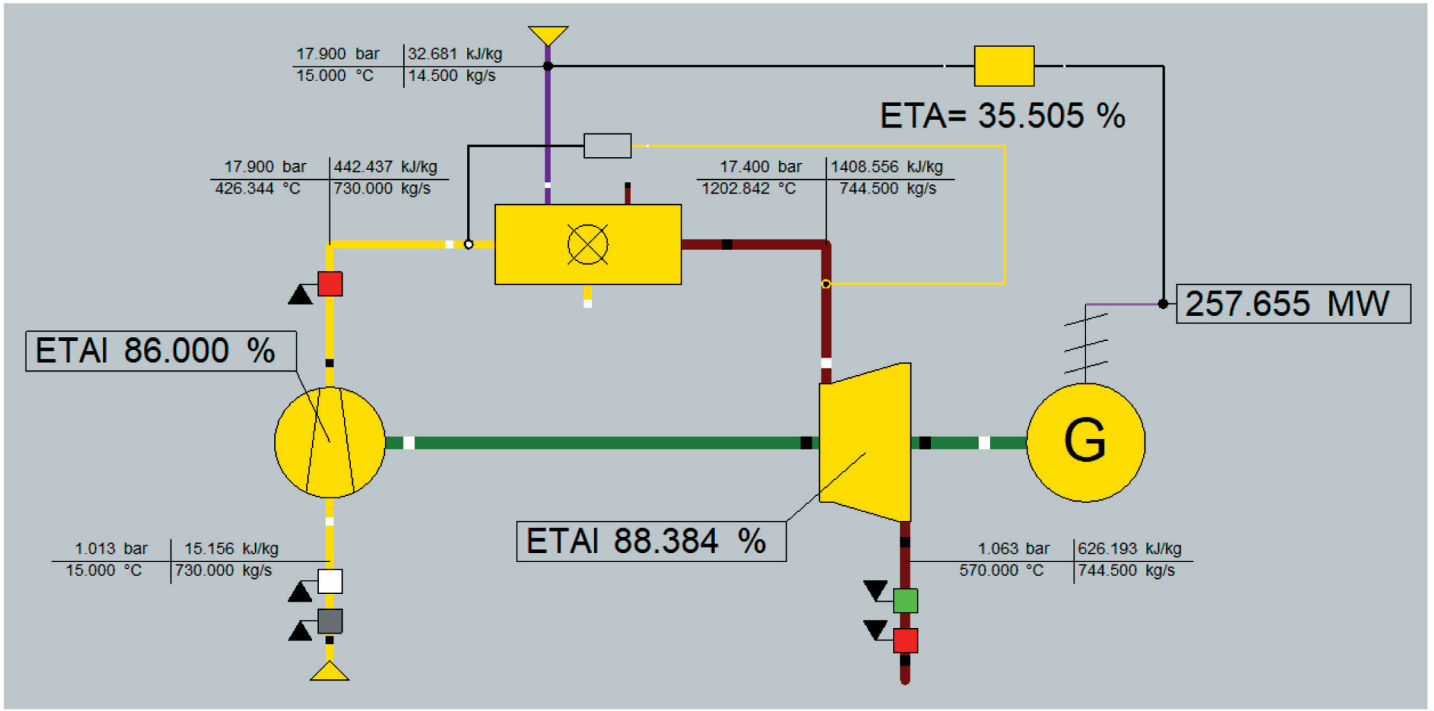
Rys. 80. Komponent komory spalania uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



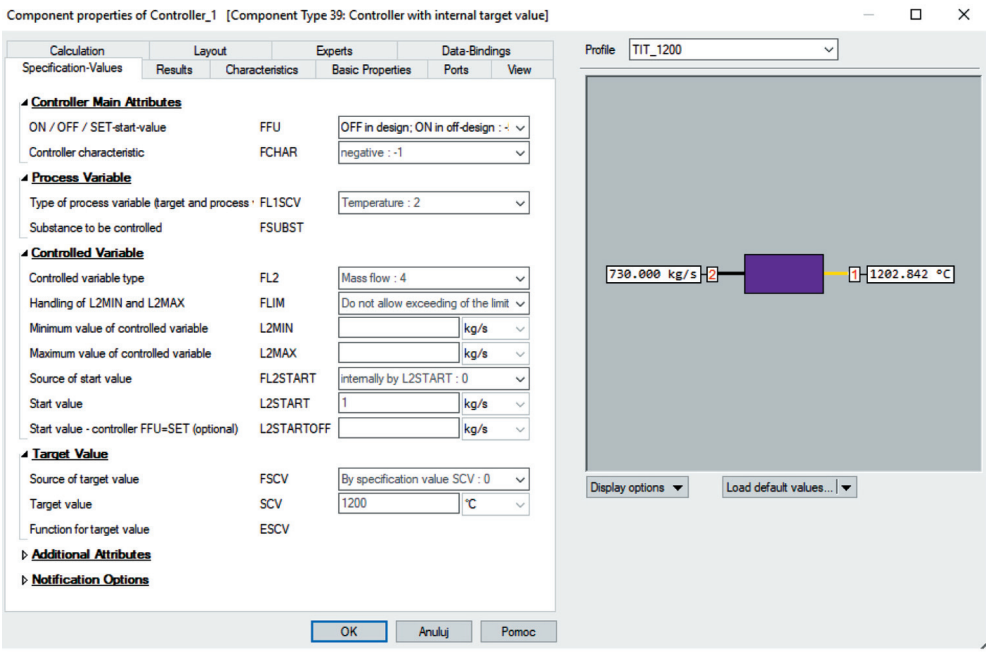
Rys. 81. Komponent ekspandera gazowego uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

d) Uzupełnić strukturę modelu o dodatkowe komponenty (**Boundary input value – Comp 1** oraz **Measured value input – Comp 46**) (rys. 82) umożliwiające definiowanie danych wejściowych, takich jak temperatura, ciśnienie, przepływ masowy oraz wilgotność powietrza na wlocie do sprężarki, ciśnienie powietrza za sprężarką, temperatura, przepływ masowy oraz skład gazu do komory spalania, temperatura i ciśnienie spalin za turbiną gazową.
e) Zapisać opracowany model pod nazwą *Turbina_Gazowa_model.ebs*.
f) Przeprowadzić obliczenia (przycisk *Simulation* lub klawisz F9) i uzupełnić model o elementy pozwalające na prezentację wybranych parametrów (opcja *Insert value-cross*). Wyświetlić uzyskaną moc elektryczną turbiny gazowej oraz wartości temperatury, ciśnienia, entalpi oraz przepływu masowego w charakterystycznych punktach obiegu zgodnie z rysunkiem 82. Dodatkowo należy wyznaczyć sprawność energetyczną układu turbiny gazowej z wykorzystaniem komponentu **Efficiency meter** (**Comp 32**). Wyświetlić wartości sprawności izentropowej dla sprężarki i ekspandera gazowego. Porównać uzyskane wyniki.
g) Zapisać model z wynikami symulacji pod nazwą *Turbina_Gazowa_wyniki.ebs*.

5. Utworzyć trzy nowe profile obliczeniowe celem przeprowadzenia symulacji pracy turbiny gazowej w trybie *off-design* przy zmiennej temperaturze spalin na wlocie do ekspandera gazowego. Utworzonym profilom nadać odpowiednio nazwy: *TIT_1200*, *TIT_1250* oraz *TIT_1300*.
6. Wprowadzić dodatkowy komponent, który umożliwi kontrolę zadanej temperatury spalin za komorą spalania przez zmianę strumienia masowego powietrza przepływającego przez sprężarkę turbiny gazowej. W tym celu należy wybrać komponent **Controller with internal target value** (**Comp 39**), następnie połączyć wejście *Corrected variable* z linią powietrza i *Actual value* z linią spalin za komorą spalania. Ustawienia obliczeniowe komponentu kontrolera należy ustawić zgodnie z danymi na rysunku 83, zwracając szczególną uwagę na następujące parametry: *Controller characteristic*, *Type of process variable (target and proces)* oraz *Controlled variable type*. Charakterystyka tego kontrolera jest negatywna, gdyż wraz ze wzrostem temperatury spalin za komorą spalania musi maleć strumień masowy powietrza (przy zachowaniu pozostałych parametrów niezmiennych) i odwrotnie. W ostatnim kroku należy wykluczyć zadaną wartość strumienia masowego powietrza z modelu, zmianiając ustawienia parametru *Switch* na wartość *On in design, off in off-desing : 4* w komponencie 46 (wlot powietrza do sprężarki). W każdym z utworzonych profili należy wprowadzić wartość temperatury spalin za komorą spalania zgodnie z wartością znajdującą się w ich nazwie: 1200°C, 1250°C oraz 1300°C. Zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_off_design_model.ebs*.



Rys. 82. Model turbiny gazowej z wynikami obliczeń symulacyjnych dla danych wejściowych z tabeli 7



Rys. 83. Komponent kontrolera uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia dla profilu *TIT_1200*

7. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych (*TIT_1200*, *TIT_1250* oraz *TIT_1300*), a wyniki dla poszczególnych wariantów eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*).
8. Zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_off_design_wyniki.ebs*.

Zadanie dodatkowe

1. W każdym z utworzonych profili *off-design* należy przeprowadzić analizę wrażliwości sprawności energetycznej układu oraz mocy elektrycznej na zmianę temperatury powietrza wlotowego do sprężarki. Analizę należy przeprowadzić w zakresie wartości temperatury powietrza od 0°C do 30°C z krokiem 5°C. Pozostałe parametry należy zachować niezmienione.
2. Uzyskane wyniki wyeksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml*. Zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_zadanie_dodatkowe.ebs*.

Podsumowanie

Wykonanie zadania pozwoliło zapoznać się z podstawowymi komponentami modelu turbiny gazowej i przeprowadzić obliczenia. Użytkownik poznał sposób działania

podstawowych trybów obliczeniowych dla komponentów sprężarki, komory spalania oraz ekspandera gazowego.

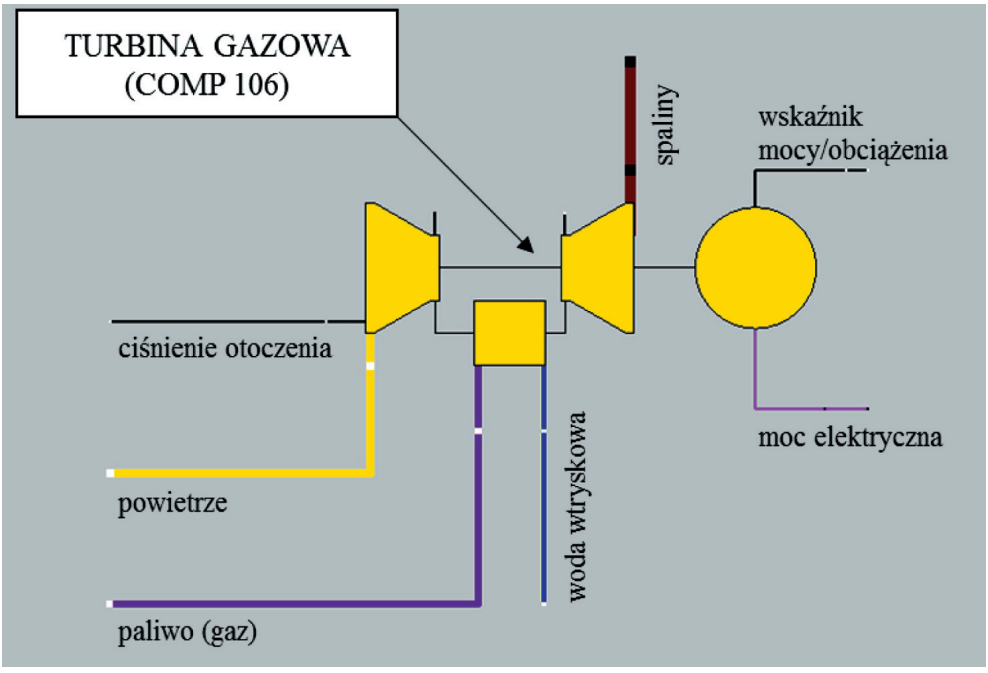
Ćwiczenie 2
Zaawansowany model turbiny gazowej – wykorzystanie bilbioteki OEM-GTLib

Cel ćwiczenia

Wykonanie obliczeń symulacyjnych na podstawie gotowego komponentu zawierającego model turbiny gazowej wraz z jej charakterystykami energetycznymi dostarczonymi przez producentów turbin gazowych. Przeprowadzenie analizy wpływu wybranych parametrów termodynamicznych na osiągi turbiny gazowej.

Opis zadań do wykonania

Wykorzystując wybrany typ turbiny gazowej, przygotować model układu zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 84. Model składać się będzie wyłącznie z komponentu turbiny gazowej (biblioteka OEM-GTLib). W celu przeprowadzenia obliczeń wykorzystać dane wejściowe przedstawione w tabeli 8.



Rys. 84. Model turbiny gazowej w bibliotece OEM-GTLib

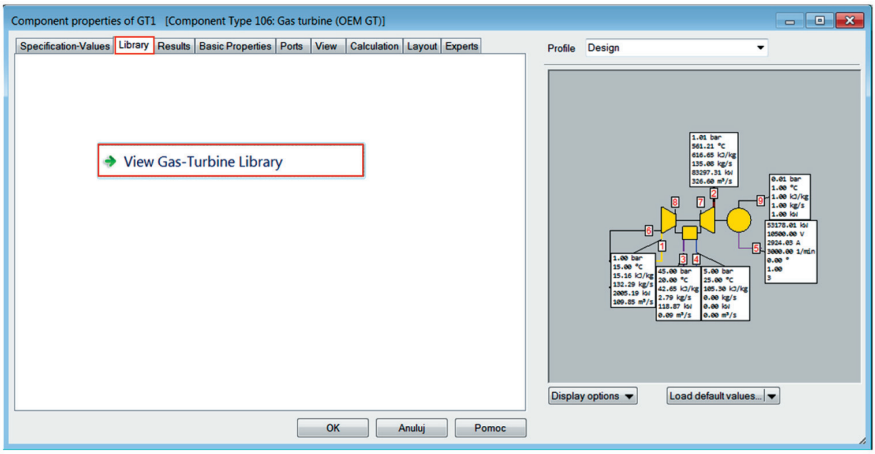
Tabela 8

Dane wejściowe do modelu turbiny gazowej OEM-GTLib

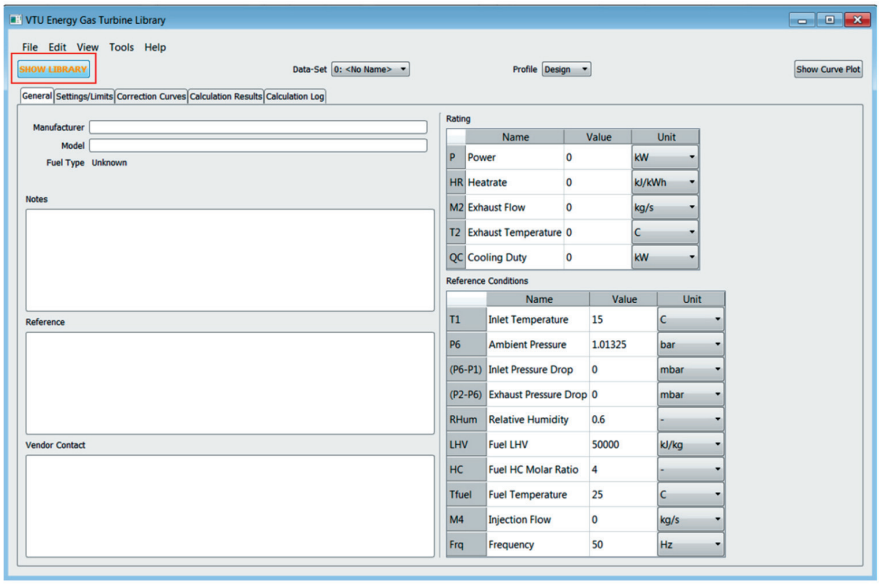
Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura powietrza na wlocie do sprężarki	15,00	°C	46
Ciśnienie powietrza na wlocie do sprężarki	1,01	bar	46
Wilgotność względna powietrza na wlocie do sprężarki	60,00	%	46
Temperatura gazu do komory spalania	15,00	°C	46
Ciśnienie gazu do komory spalania	45,00	bar	46
Skład gazu: – CH_4 – C_2H_6 – CO_2 – N_2	udział molowy 96,40 2,00 0,20 1,40	%	1
Skład powietrza: – O_2 – N_2 – Ar	udział molowy 21,00 78,10 0,90	%	1
Ciśnienie spalin na wylocie z turbiny gazowej	1,02	bar	46
Temperatura wody wtryskowej	25,00	°C	1
Ciśnienie wody wtryskowej	5,00	bar	1
Wskaźnik obciążenia turbiny gazowej	1,00	kJ/kg	46
Dodatkowe straty ciepła	300,00	kW	106
Sprawność generatora	98,50	%	106

Instrukcja wykonania modelu

1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_OEM_GT_model.ebs*.
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy następujący komponent: **Gas turbine OEM GT** (**Comp 106**).
3. Przygotować model turbiny gazowej, doprowadzając odpowiednie linie w punktach wejścia i wyjścia komponentu zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 84.
4. W celu wyboru danego typu modelu turbiny gazowej należy wykonać następujące kroki:
   a) Dwukrotnie kliknąć na komponent turbiny gazowej, w zakładce *Library*, w polu *View gas-turbine library* (rys. 85), w oknie widoku *VTU energy gas turbine library* nacisnąć przycisk *Show library* (rys. 86).

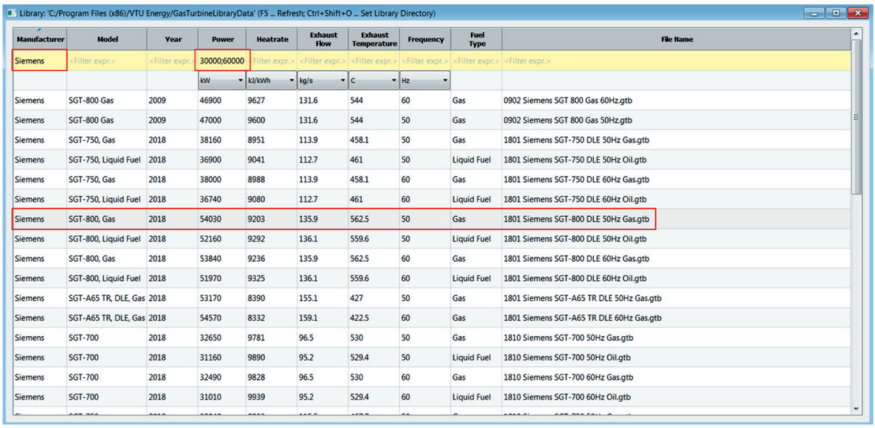


Rys. 85. Okno ustawień komponentu **Gas turbine OEM GT (Comp 106)**



Rys. 86. Okno zawierające informacje o wybranej bibliotece turbiny gazowej

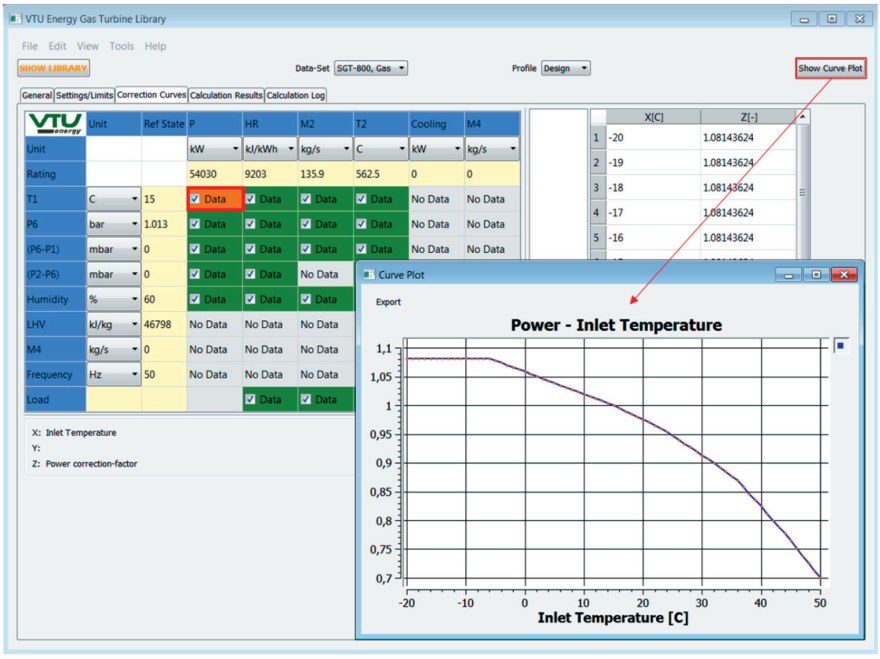
b) Otwarte okno przedstawia listę dostępnych modeli turbin gazowych, które zawierają zestaw charakterystyk energetycznych dostarczonych przez producentów. Należy wyszukać turbinę gazową Siemens SGT-800 (nazwa pliku *1801 Siemens SGT-800 DLE 50Hz Gas.gtb*) i dwukrotnie kliknąć celem załadowania pliku do modelu (rys. 87). Po pojawieniu się komunikatu *Overwrite existing data?* kliknąć przycisk *Yes* i przejść do zakładki *Corection Curves*.



Manufacturer	Model	Year	Power	Heatrate	Exhaust Flow	Exhaust Temperature	Frequency	Fuel Type	File Name
Siemens	<Filter expr.>	<Filter expr.>	30000;60000	<Filter expr.>	<Filter expr.>	<Filter expr.>	<Filter expr.>	<Filter expr.>	<Filter expr.>
			kW	kJ/kWh	kg/s	C	Hz		
Siemens	SGT-800 Gas	2009	46900	9627	131.6	544	60	Gas	0902 Siemens SGT 800 Gas 60Hz.gtb
Siemens	SGT-800 Gas	2009	47000	9600	131.6	544	50	Gas	0902 Siemens SGT 800 Gas 50Hz.gtb
Siemens	SGT-750, Gas	2018	38160	8951	113.9	458.1	50	Gas	1801 Siemens SGT-750 DLE 50Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-750, Liquid Fuel	2018	36900	9041	112.7	461	50	Liquid Fuel	1801 Siemens SGT-750 DLE 50Hz Oil.gtb
Siemens	SGT-750, Gas	2018	38000	8988	113.9	458.1	60	Gas	1801 Siemens SGT-750 DLE 60Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-750, Liquid Fuel	2018	36740	9080	112.7	461	60	Liquid Fuel	1801 Siemens SGT-750 DLE 60Hz Oil.gtb
Siemens	SGT-800, Gas	2018	54030	9203	135.9	562.5	50	Gas	1801 Siemens SGT-800 DLE 50Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-800, Liquid Fuel	2018	52160	9292	136.1	559.6	50	Liquid Fuel	1801 Siemens SGT-800 DLE 50Hz Oil.gtb
Siemens	SGT-800, Gas	2018	53840	9236	135.9	562.5	60	Gas	1801 Siemens SGT-800 DLE 60Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-800, Liquid Fuel	2018	51970	9325	136.1	559.6	60	Liquid Fuel	1801 Siemens SGT-800 DLE 60Hz Oil.gtb
Siemens	SGT-A65 TR, DLE, Gas	2018	53170	8390	155.1	427	50	Gas	1801 Siemens SGT-A65 TR DLE 50Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-A65 TR, DLE, Gas	2018	54570	8332	159.1	422.5	60	Gas	1801 Siemens SGT-A65 TR DLE 60Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-700	2018	32650	9781	96.5	530	50	Gas	1810 Siemens SGT-700 50Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-700	2018	31160	9890	95.2	529.4	50	Liquid Fuel	1810 Siemens SGT-700 50Hz Oil.gtb
Siemens	SGT-700	2018	32490	9828	96.5	530	60	Gas	1810 Siemens SGT-700 60Hz Gas.gtb
Siemens	SGT-700	2018	31010	9939	95.2	529.4	60	Liquid Fuel	1810 Siemens SGT-700 60Hz Oil.gtb

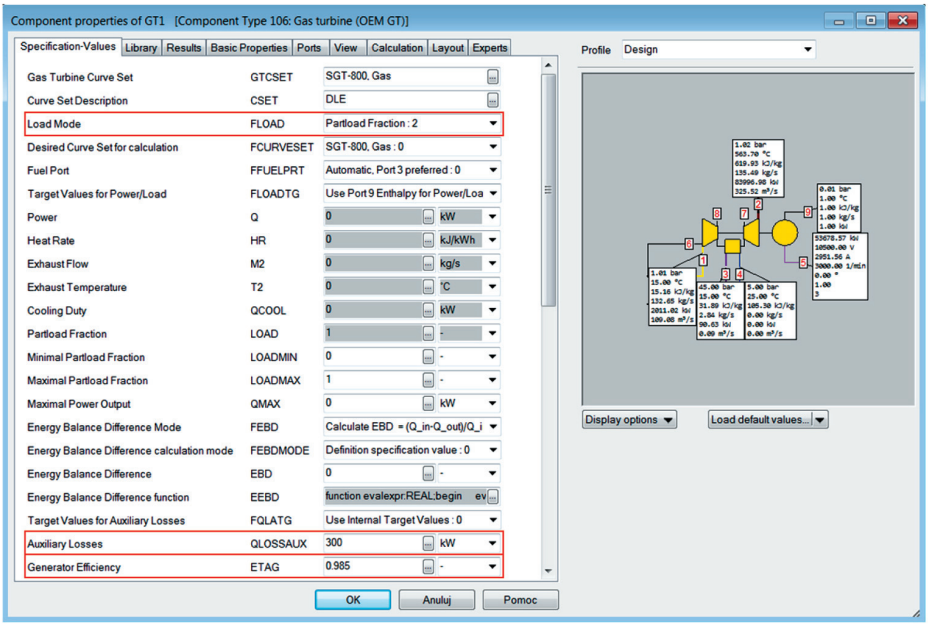
Rys. 87. Zestawienie biblioteki zawierającej listę dostępnych modeli turbin gazowych

c) Otwarte okno zawiera informację o dostępności krzywych korekcyjnych dla wybranych parametrów pracy turbiny gazowej, które są wykorzystywane w obliczeniach. Zielone pole oznacza dostępność danej charakterystyki, a naciśnięcie przycisku *Show curve plot* pozwala na wizualizację wybranej krzywej korekcyjnej (rys. 88).



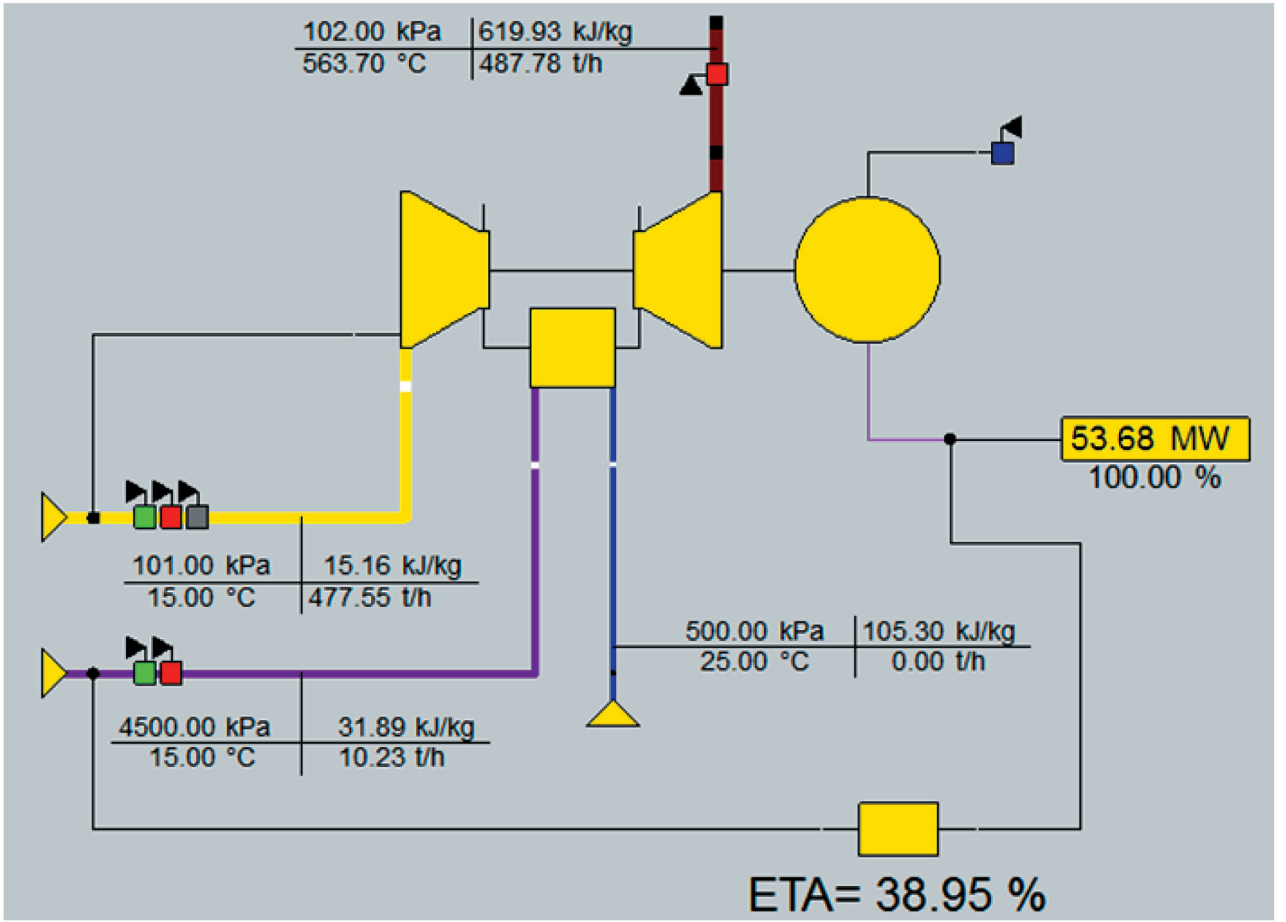
Rys. 88. Okno przedstawiające zawartość biblioteki wybranego modelu turbiny gazowej z zaznaczeniem dostępnych krzywych korekcyjnych dla danych parametrów

d) Wprowadzić dane wejściowe zgodnie z zestawieniem w tabeli 8 oraz uzupełnić strukturę modelu o dodatkowe komponenty umożliwiające definiowanie założeń obliczeniowych. Dodatkowo należy w ustawieniach komponentu turbiny gazowej ustawić parametr *Load Mode (FLOAD)* na wartość *Partload Fraction : 2* (rys. 89). Zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_OEM_GT_model.ebs*.



Rys. 89. Komponent turbiny gazowej uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

5. Komponent turbiny gazowej **Gas turbine (OEM GT)** pozwala na symulację jej pracy z wykorzystaniem charakterystyk w postaci krzywych korekcyjnych dostarczonych przez producenta. W bibliotece komponentu dostępne są modele turbin gazowych następujących firm: Alstom, Ansaldo Energia, CENTRAX, Capstone, General Electric, Hitachi, Kawasaki, MAN, MHPS, OPRA, Rolls-Royce, Siemens oraz Solar Turbines. Zakres nominalnych mocy elektrycznych dostępnych turbin gazowych zawiera się w przedziale od 30 kW do 570 MW.
6. Przeprowadzić obliczenia (przycisk *Simulation* lub klawisz F9) i uzupełnić model o elementy pozwalające na prezentację wybranych parametrów (opcja *Insert value--cross*). Wyświetlić uzyskaną moc elektryczną turbiny gazowej oraz wartości temperatury, ciśnienia, entalpi oraz przepływu masowego w charakterystycznych punktach obiegu zgodnie z rysunkiem 90. Dodatkowo należy wyznaczyć sprawność energetyczną układu turbiny gazowej z wykorzystaniem komponentu **Efficiency meter** (**Comp 32**). Porównać uzyskane wyniki. Zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_OEM_GT_wyniki.ebs*.



Rys. 90. Model turbiny gazowej z wynikami obliczeń dla zadanych danych wejściowych

7. Utworzyć trzy nowe profile obliczeniowe celem przeprowadzenia symulacji pracy turbiny gazowej w trybie *off-design* przy zmiennym obciążeniu. Utworzonym profilom nadać odpowiednio nazwy: *LOAD_100%*, *LOAD_90%* oraz *LOAD_80%*. W każdym z utworzonych profili należy wprowadzić wartość wskaźnika obciążenia zgodnie z wartością znajdującą się w ich nazwie: 1; 0,9 oraz 0,8.
8. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych (*LOAD_100%*, *LOAD_90%* oraz *LOAD_80%*), a wyniki dla poszczególnych wariantów eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*). Zapisać plik pod nazwą *Turbina_Gazowa_OEM_GT_off-design_wyniki.ebs*.

Zadanie dodatkowe

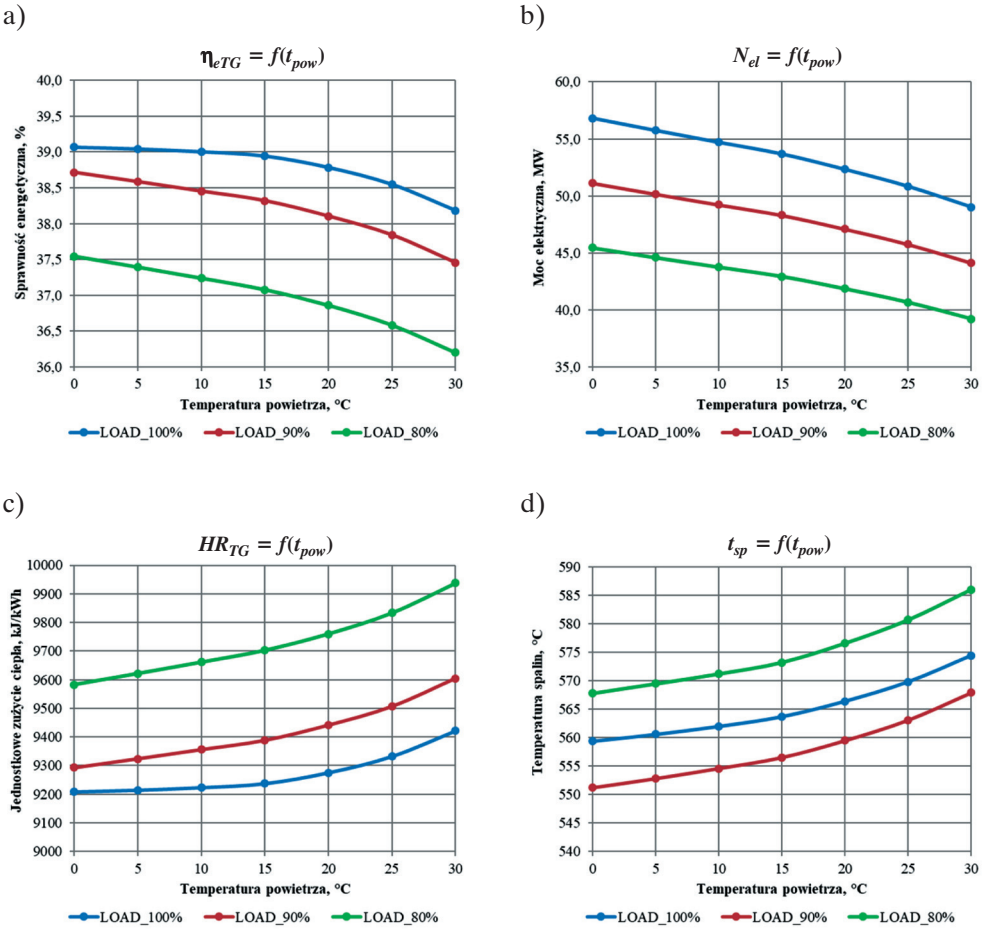
1. W każdym z utworzonych profili *off-design* należy przeprowadzić obliczenia wariantowe przy zmiennej temperaturze powietrza wlotowego do sprężarki i określić jej wpływ na następujące parametry: sprawność energetyczną turbiny gazowej, moc elektryczną, jednostkowe zużycie ciepła (*heat rate*) oraz temperaturę spalin wylotowych z turbiny. Analizę należy przeprowadzić w zakresie wartości temperatury powietrza od 0°C do 30°C z krokiem 5°C (rys. 91). Pozostałe parametry należy zachować niezmienione. W obliczeniach wykorzystać plik *Turbina_Gazowa_OEM_GT_off-design_wyniki*.
2. Zadanie rozwiązać w programie MS Excel z wykorzystaniem dodatku Ebsilon for Excel Add-in. Uzyskane rezultaty przedstawić na wykresie i opracować charakterystyki zmian wymienionych parametrów w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego dla każdego profilu obciążenia turbiny gazowej osobno (rys. 92). Arkusz kalkulacyjny z wynikami obliczeń w programie MS Excel zapisać pod nazwą *Turbina_Gazowa_OEM_GT_Excel.xlsx*.

Podsumowanie

Realizacja zadania miała na celu zapoznanie użytkownika z działaniem komponentu turbiny gazowej zawierającego charakterystyki energetyczne i krzywe korekcyjne dostarczane przez producentów tego typu urządzeń. Użytkownik powinien opanować sposób działania komponentu turbiny gazowej **Gas turbine (OEM GT)**, umiejętność korzystania z dostępnych bibliotek turbin gazowych oraz wykonywania obliczeń symulacyjnych przy zmiennych parametrach wejściowych do modelu.

ModelFile	BeginData						Temperatura powietrza	Sprawność energetyczna	Moc elektryczna	Jednostkowe zużycie ciepła	Temperatura spalin	EndData
Turbina_gazowa_OEM_GT_2.ebs	Type						spec	result	result	result	result	
	Name	@ProfileName	@Errors	@Warnings	@Status	@ExecutionTime	Measuring_point.T	Efficiency_meter.E	Logic_2.Q	GT1.RHR	Fluegas.T	
	Description						Measured or start	Efficiency	Energy flow	Heat Rate	Temperature	
	Unit						°C	%	MW	kJ/kWh	°C	
	FirstProfile	LOAD_100%	0	0	Success		0	39,1	56,8	9208	559,4	
		LOAD_100%	0	0	Success		5	39,0	55,7	9215	560,6	
		LOAD_100%	0	0	Success		10	39,0	54,7	9224	562,0	
		LOAD_100%	0	0	Success		15	38,9	53,7	9238	563,7	
		LOAD_100%	0	0	Success		20	38,8	52,3	9276	566,4	
		LOAD_100%	0	0	Success		25	38,5	50,8	9333	569,8	
		LOAD_100%	0	0	Success		30	38,2	49,0	9422	574,4	
		LOAD_90%	0	0	Success		0	38,7	51,1	9293	551,2	
		LOAD_90%	0	0	Success		5	38,6	50,2	9324	552,8	
		LOAD_90%	0	0	Success		10	38,5	49,2	9356	554,6	
		LOAD_90%	0	0	Success		15	38,3	48,3	9388	556,5	
		LOAD_90%	0	0	Success		20	38,1	47,1	9441	559,5	
		LOAD_90%	0	0	Success		25	37,8	45,8	9506	563,1	
		LOAD_90%	0	0	Success		30	37,5	44,1	9604	567,9	
		LOAD_80%	0	0	Success		0	37,5	45,5	9583	567,8	
		LOAD_80%	0	0	Success		5	37,4	44,6	9622	569,5	
		LOAD_80%	0	0	Success		10	37,2	43,8	9661	571,2	
		LOAD_80%	0	0	Success		15	37,1	42,9	9703	573,2	
		LOAD_80%	0	0	Success		20	36,9	41,9	9760	576,6	
		LOAD_80%	0	0	Success		25	36,6	40,7	9833	580,7	
		LOAD_80%	0	0	Success		30	36,2	39,2	9937	586,0	
	LastProfile											

Rys. 91. Widok arkusza kalkulacyjnego (MS Excel) ze skonfigurowanym zestawem danych wejściowych i wyników obliczeń wskaźników energetycznych pracy turbiny gazowej



Rys. 92. Charakterystyki wpływu zmiany temperatury powietrza doprowadzanego do sprężarki turbiny gazowej na uzyskiwaną sprawność energetyczną (a), moc elektryczną (b), jednostkowe zużycie ciepła (c) oraz temperaturę spalin (d) na przykładzie turbiny gazowej Siemens SGT-800 DLE 50 Hz

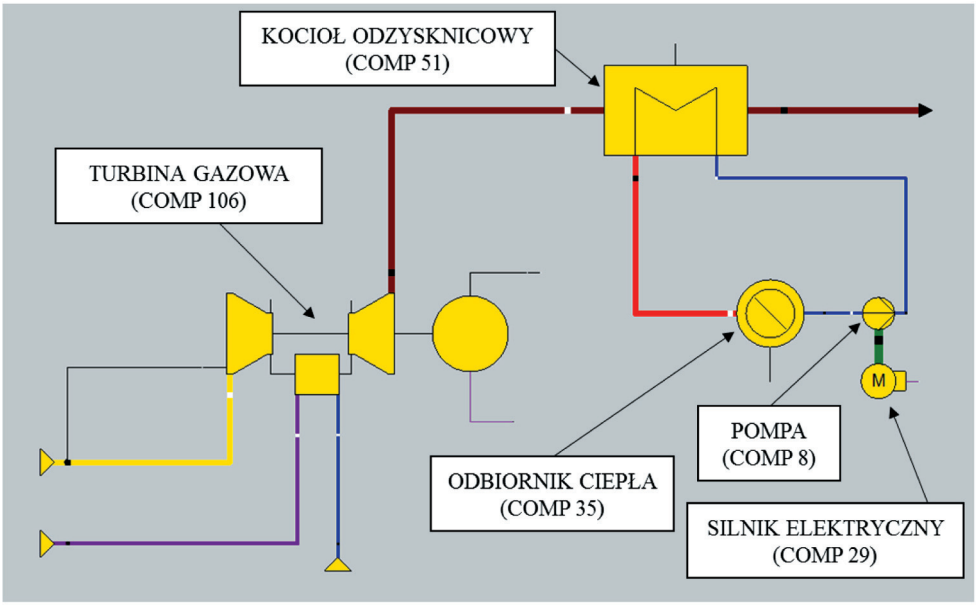
Ćwiczenie 3
Model elektrowni gazowej

Cel ćwiczenia

Opracowanie modelu elektrowni gazowej wyposażonej w zestaw turbiny gazowej oraz układ kotła odzyskowego do produkcji pary technologicznej. Przeprowadzenie obliczeń mających na celu określenie mocy cieplnej możliwej do uzyskania z zastosowaniem wybranego układu odzysku ciepła ze spalin.

Opis zadań do wykonania

Do wykonania ćwiczenia należy wykorzystać zaawansowany model turbiny gazowej z ćwiczenia 2 (rozdz. 4). Zadanie można także zrealizować dla modelu zbudowanego z poszczególnych komponentów (ćwiczenie 1, rozdz. 4), należy jednak pamiętać, że uzyskane wyniki mogą się różnić. Model elektrowni gazowej należy wykonać zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 93. Model składać się będzie z następujących komponentów: turbina gazowa, wysokotemperaturowy wymiennik ciepłowniczy, odbiornik ciepła, pompa oraz silnik elektryczny. W celu przeprowadzenia obliczeń wykorzystać dane wejściowe przedstawione w tabeli 9.



Rys. 93. Model turbiny gazowej i układu odzysku ciepła ze spalin

Tabela 9

Dane wejściowe do modelu elektrowni gazowej

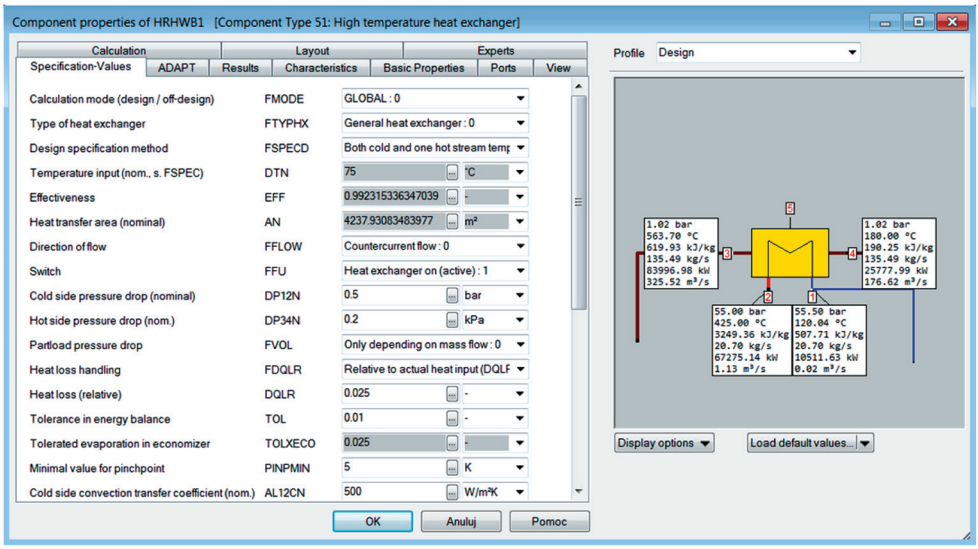
Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura powietrza na wlocie do sprężarki	15,00	°C	46
Ciśnienie powietrza na wlocie do sprężarki	1,01	bar	46
Wilgotność względna powietrza na wlocie do sprężarki	60,00	%	46

Tabela 9 cd.

Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura gazu do komory spalania	15,00	°C	46
Ciśnienie gazu do komory spalania	45,00	bar	46
Skład gazu – CH_4 – C_2H_6 – CO_2 – N_2	udział molowy 96,40 2,00 0,20 1,40	%	1
Skład powietrza: – O_2 – N_2 – Ar	udział molowy 21,00 78,10 0,90	%	1
Ciśnienie spalin na wylocie z turbiny gazowej	1,02	bar	46
Temperatura wody wtryskowej	25,00	°C	1
Ciśnienie wody wtryskowej	5,00	bar	1
Wskaźnik obciążenia turbiny gazowej	1,00	kJ/kg	46
Dodatkowe straty ciepła	300,00	kW	106
Sprawność generatora	98,50	%	106
Temperatura pary technologicznej	425,00	°C	46
Ciśnienie pary technologicznej	55,00	bar	46
Temperatura kondensatu	120,00	°C	46
Spadek ciśnienia na odbiorniku ciepła	5,00	bar	35
Temperatura spalin za układem odzysku ciepła	180,00	°C	46
Względne straty ciepła w wymienniku wysokotemperaturowym	2,50	%	51
Sprawność izentropowa pompy	80,00	%	8
Sprawność elektryczna silnika	85,00	%	29
Sprawność mechaniczna pompy i silnika elektrycznego	99,80	%	8, 29

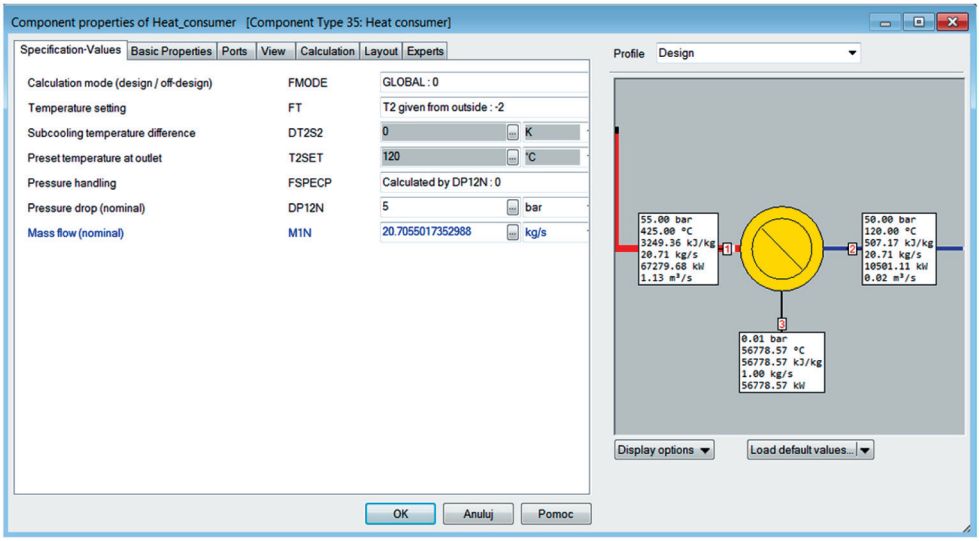
Instrukcja wykonania modelu

1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, wczytać plik z ćwiczenia 2 (rozdz. 4) o nazwie *Turbina_Gazowa_OEM_GT_model.ebs*. Zapisać otwarty plik pod nową nazwą *Odzysk_Ciepla_TG_model.ebs*.
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy dodatkowe komponenty:
   – wymiennik wysokotemperaturowy (**High tempererature heat exchanger – Comp 51**),
   – odbiornik ciepła (**Heat consumer – Comp 35**),
   – pompę (**Pump – Comp 8**),
   – silnik elektryczny (**Motor – Comp 29**).
3. Przygotować model układu turbiny gazowej z odzyskiem ciepła i odpowiednio połączyć komponenty zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 93.
4. Wprowadzić dane wejściowe (tab. 9) oraz uzupełnić strukturę modelu o dodatkowe komponenty umożliwiające definiowanie założeń obliczeniowych:
   a) Komponent wymiennika wysokotemperaturowego (**Comp 51**) reprezentuje układ kotła odzysknicowego do produkcji pary technologicznej z wykorzystaniem ciepła ze spalin turbiny gazowej. W komponencie należy wprowadzić następujące ustawienia: *Type of heat exchanger (FTYPHX)* → *General heat exchanger : 0*, *Design specification method (FSPECD)* → *Both cold and one hot stream temperatures given : 5* oraz *Heat loss handling (FDQLR)* → *Relative to actual heat input : 1*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe pozostawić należy tak jak na rysunku 94.



Rys. 94. Komponent wymiennika wysokotemperaturowego uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

b) W komponencie odbiornika ciepła (**Comp 35**) należy ustawić wartość parametru *Temperature setting (FT)* na *T2 given from outside : –2* oraz *Pressure handling (FSPECP)* na *Calculated by DP12N : 0*. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z informacjami na rysunku 95.



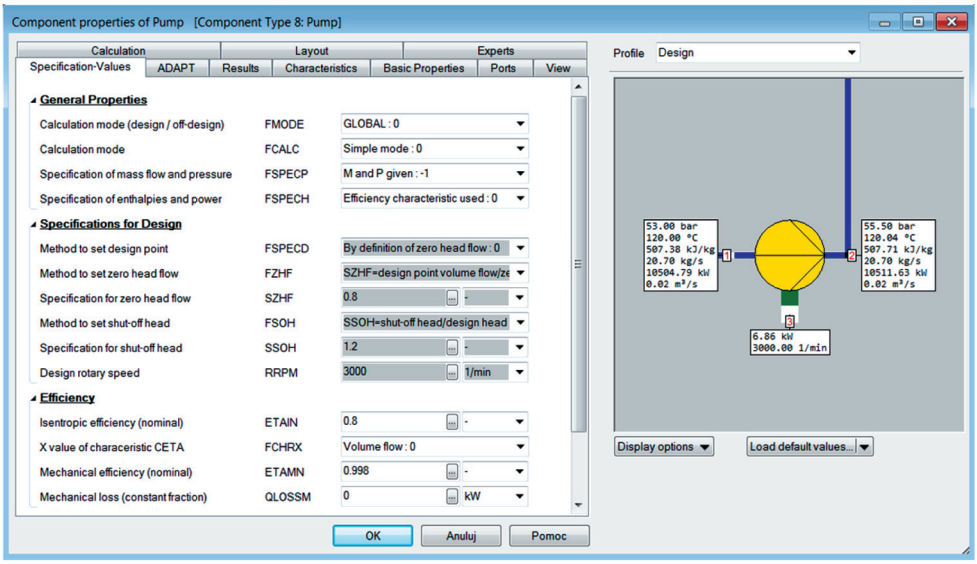
Rys. 95. Komponent odbiornika ciepła uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

c) W komponencie pompy (**Comp 8**) należy ustawić wartość parametru *Calculation mode (FCALC)* na *Simple mode : 0* oraz *Specification of mass flow and pressure (FSPECP)* na *M and P given : –1*. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z danymi na rysunku 96.

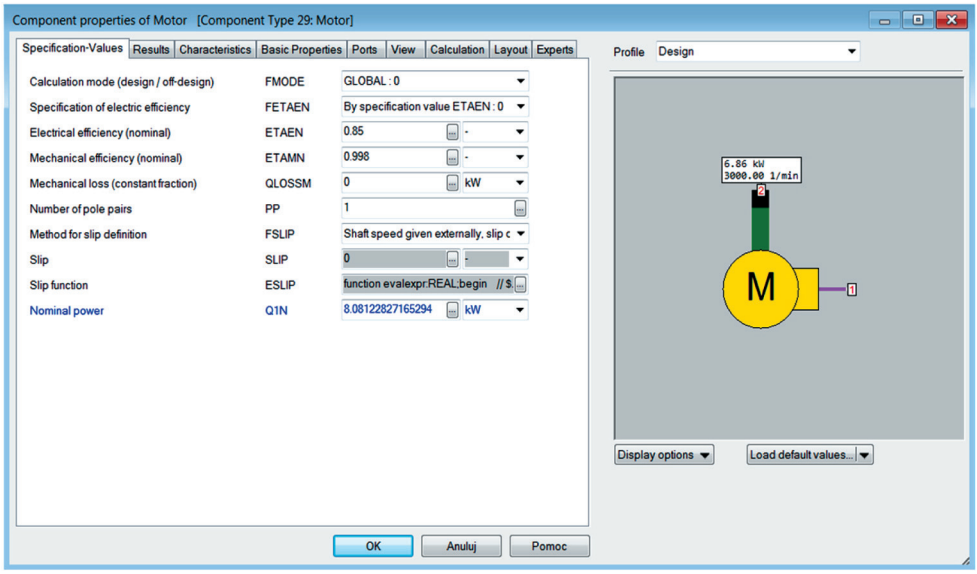
d) W komponencie silnika elektrycznego (**Comp 29**) należy ustawić wartość parametru *Specification of electric efficiency (FETAEN)* na *By specification value ETAEN : 0*. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 97.

e) Do struktury modelu należy wprowadzić dodatkowy komponent **Controller (external set value) (Comp 12)**. Jego zadaniem będzie dotrzymanie wymaganej temperatury spalin na wylocie z kotła przez regulację przepływu masowego pary technologicznej. W tym celu należy zaznaczyć następujące ustawienia: *Controller characteristic (FCHAR)* → *Negative : –1*, *Target value type (FL1L2)* → *Temperature : 2*, *Corrected variable type (FL3)* → *Mass flow : 4* oraz *Source of start value* → *internally by L3START : 0*. Należy pamiętać, aby na linii zielonej *Target value (1)* ustawić komponent umożliwiający wprowadzenie tem-

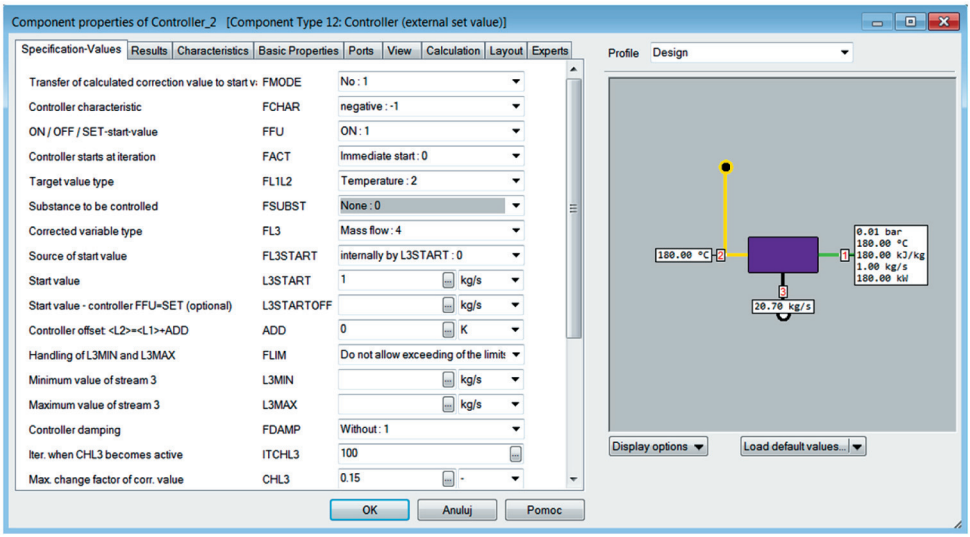
peratury spalin (**Measured value input – Comp 46**). Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 98. Zapisać model pod nazwą *Odzysk_Ciepla_TG_model.ebs.*



Rys. 96. Komponent pompy uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

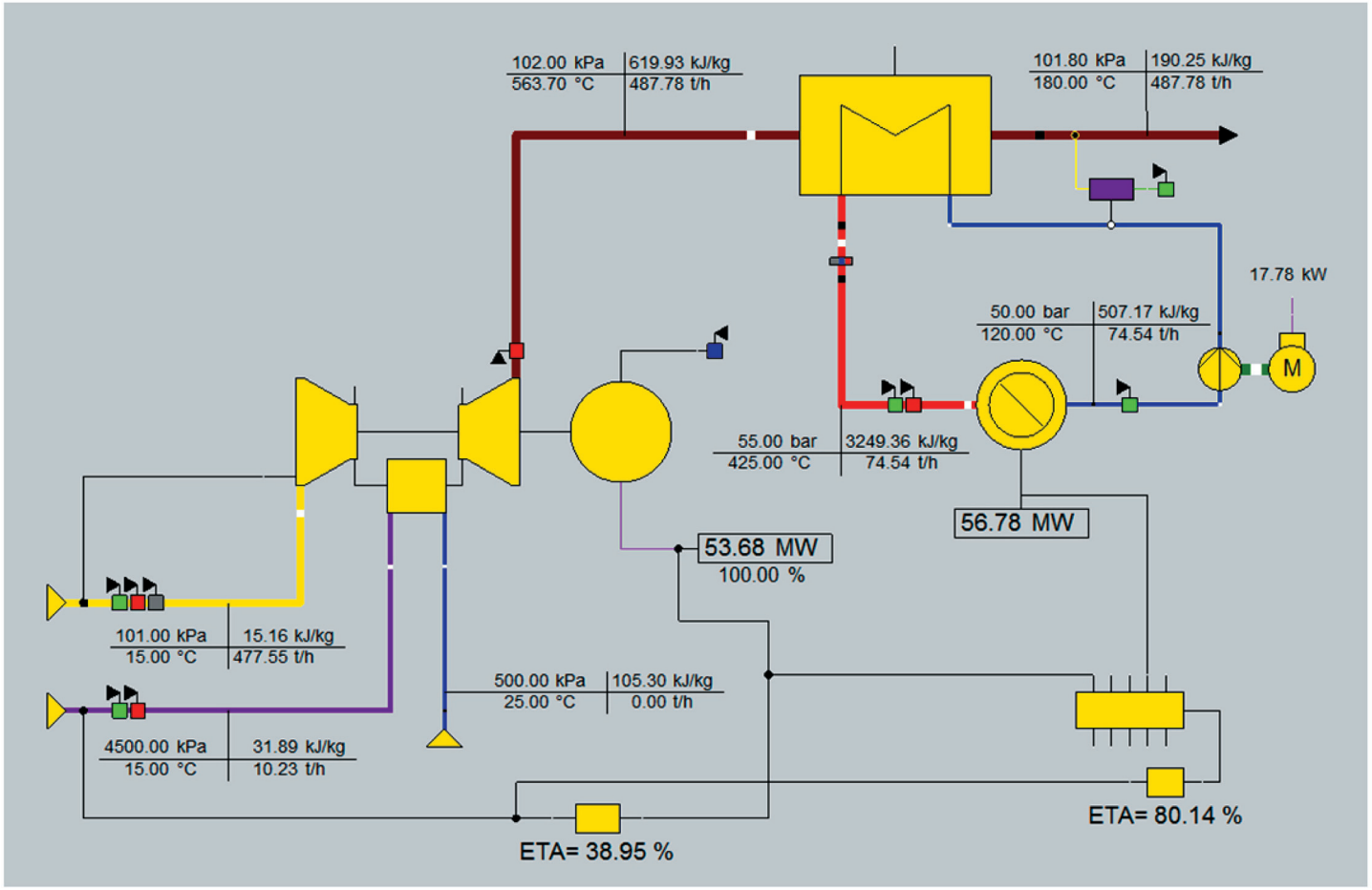


Rys. 97. Komponent silnika elektrycznego uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



Rys. 98. Komponent kontrolera temperatury spalin uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

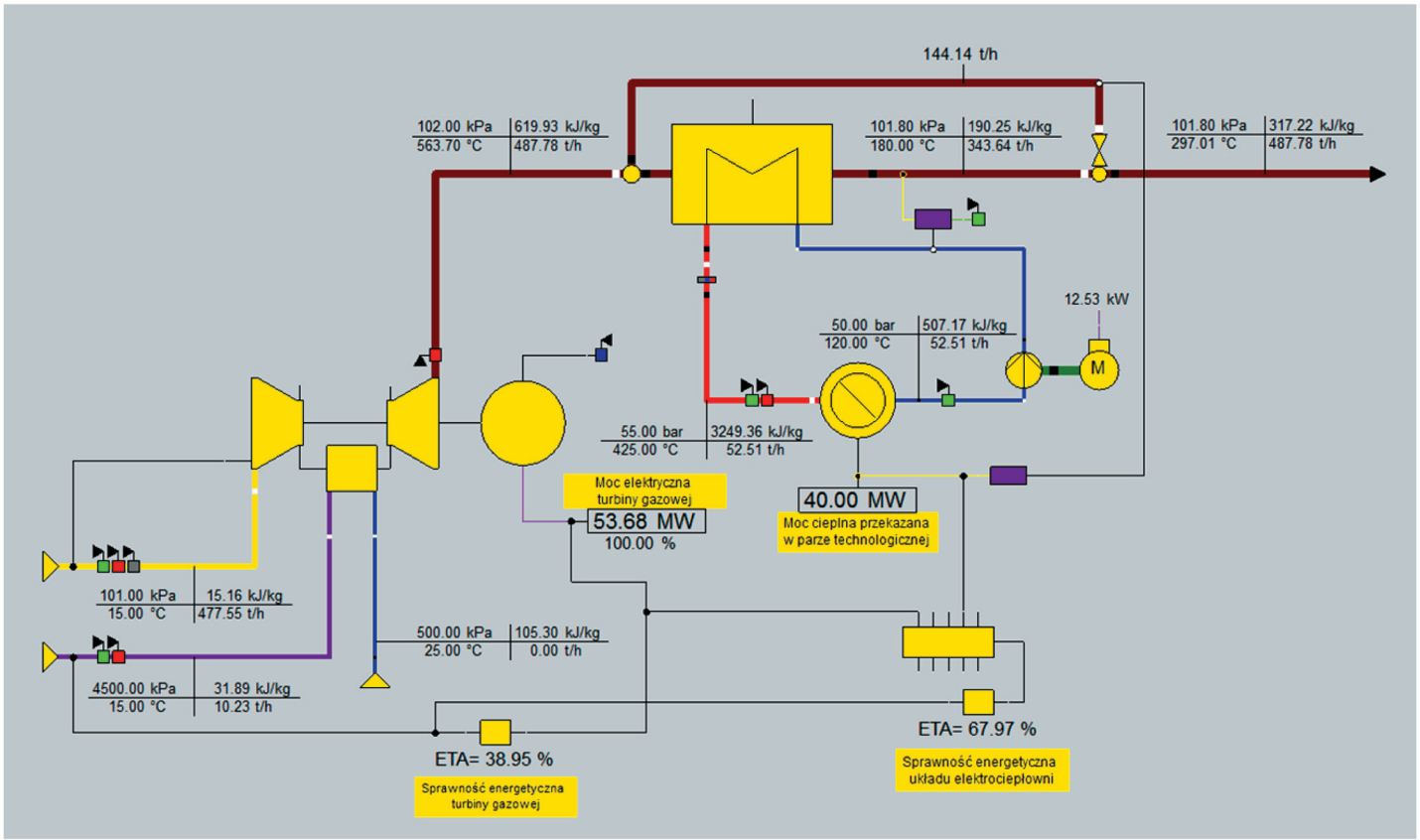
5. Przeprowadzić obliczenia (przycisk *Simulation* lub klawisz F9) i uzupełnić model o elementy pozwalające na prezentację wybranych parametrów (*Insert value-cross*). Wyświetlić uzyskaną moc elektryczną turbiny gazowej, moc cieplną odbiornika ciepła oraz wartości temperatury, ciśnienia, entalpi oraz przepływu masowego w charakterystycznych punktach obiegu zgodnie z rysunkiem 99. Dodatkowo należy wyznaczyć sprawność energetyczną układu turbiny gazowej z wykorzystaniem komponentu **Efficiency meter** (**Comp 32**) oraz sprawności energetycznej układu elektrociepłowni, wprowadzając kombinację komponentu **Power summarizer** (**Comp 31**) i komponentu **Efficiency meter** (**Comp 32**). Wprowadzenie komponentu **Power summarizer** ma na celu zsumowanie uzyskiwanej mocy elektrycznej z turbiny gazowej oraz mocy cieplnej przekazywanej w odbiorniku ciepła, aby w konsekwencji uzyskać wartość efektu energetycznego, który pozwoli zastosować komponent **Efficiency meter** do wyznaczenia sumarycznej sprawności energetycznej układu. Porównać uzyskane wyniki.
   UWAGA: w przypadku pojawiającego się ostrzeżenia (*Warning*) należy wprowadzić w modelu separator logiczny (**Comp 80**) na linii pary technologicznej wychodzącej z wymiennika wysokotemperaturowego i zaznaczyć opcję *Type of separation (FSPEC) → Mass flow (frequency) : 4*.
6. Zapisać plik pod nazwą *Odzysk_Ciepla_TG_wyniki.ebs*, a wyniki obliczeń eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File → Export → EBShtml*).



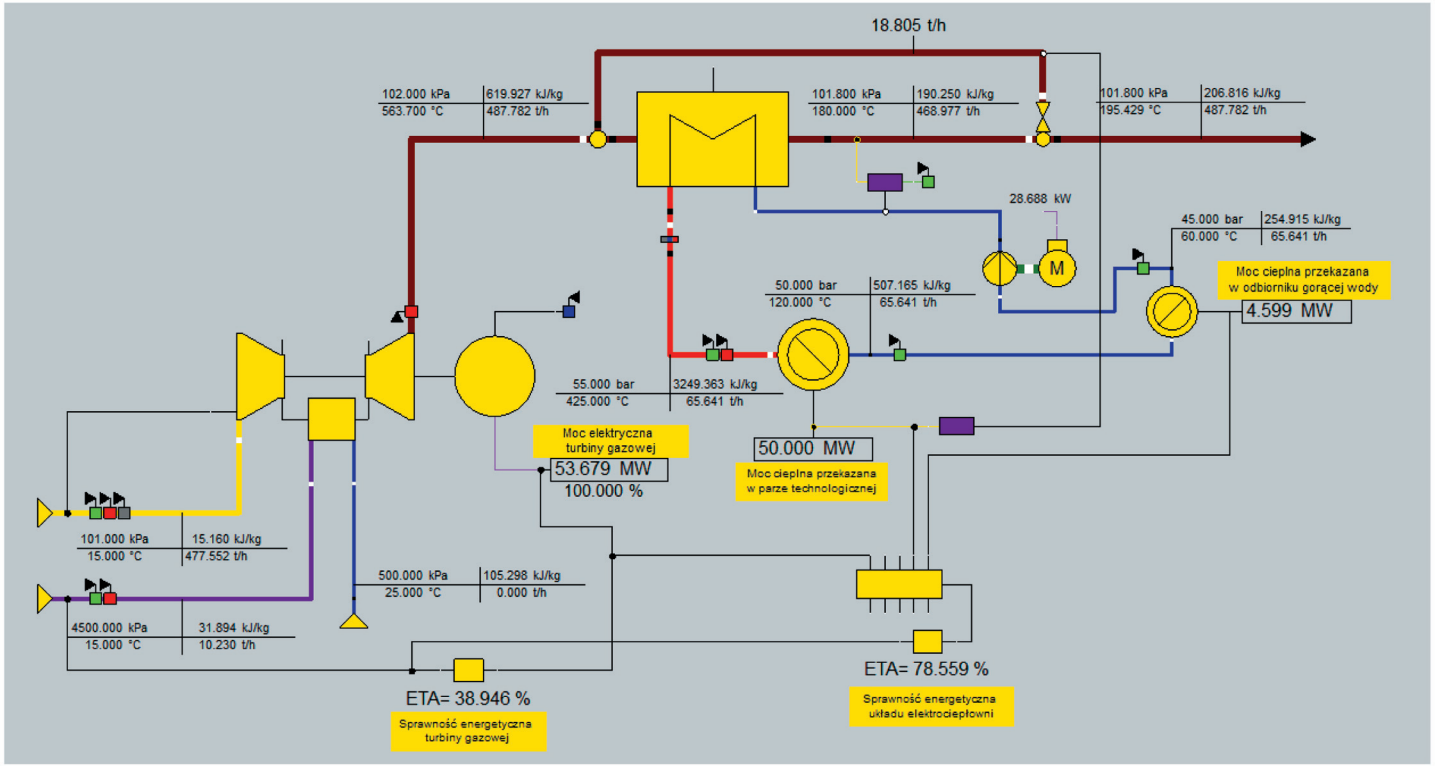
Rys. 99. Wyniki obliczeń modelu turbiny gazowej dla opracowanych danych wejściowych

Zadanie dodatkowe

1. Na podstawie pliku *Odzysk_ciepla_TG_model.ebs* rozbudować model elektrowni gazowej z układem odzysku ciepła, wprowadzając obejście dla spalin (*bypass*), które umożliwi przekierowywanie części strumienia spalin poza wymiennik odzysknicowy i kontrolę mocy cieplnej odbiornika ciepła. W tym celu należy wprowadzić do struktury modelu układu komponent o nazwie **Controller (internal set value) (Comp 39)**. Jego zadaniem będzie dotrzymanie wymaganej mocy cieplnej odbiornika pary technologicznej przez regulację przepływu masowego spalin przez wprowadzony do modelu *bypass* układu odzysku ciepła. W ustawieniach kontrolera należy wprowadzić następujące ustawienia: *Target value type (FL1SCV)* → *Power/heat flow : 5*, *Source of target value (FSCV)* → *By specification value SCV : 0*, *Controller characteristic (FCHAR)* → *Negative : –1* oraz *Source of start value (FL2START)* → *Internally by L2START : 0*. Kontroler połączyć w następujący sposób: linia żółta *Actual value (1)* z linią logiczną wychodzącą z komponentu odbiornika ciepła (moc cieplna), natomiast linia czarna *Corrected variable (2)* z linią spalin na obejściu wymiennika odzysknicowego. Przeprowadzić obliczenia dla mocy cieplnej wymaganej przez odbiornik ciepła równej 40,0 MW (wartość wprowadzić w kontrolerze w miejscu *Target value (SCV)*). Strukturę rozbudowanego modelu elektrociepłowni gazowej oraz uzyskane rezultaty porównać z danymi przedstawionymi na rysunku 100. Zapisać plik pod nazwą *Odzysk_Ciepla_TG_zadanie_dodatkowe.ebs*.
2. Utworzyć trzy nowe profile obliczeniowe celem przeprowadzenia symulacji układu w trybie *off-design* dla zmiennego obciążenia turbiny gazowej i zmiennego zapotrzebowania na moc w parze technologicznej. Utworzonym profilom nadać odpowiednio nazwy: *Q_30MW*, *Q_40MW* oraz *Q_50MW* i dodatkowo dla każdego z nich utworzyć profile *off-design* zawierające zmienną wartość wskaźnika obciążenia turbiny gazowej: *100%*, *90%* oraz *80%*. W komponencie wymiennika wysokotemperaturowego należy wprowadzić następującą zmianę w ustawieniach: *Calculation mode (design/off-design) (FMODE)* → *Local design : –1*.
3. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych, a wyniki dla poszczególnych wariantów eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*). Opracować charakterystyki układu przedstawiające zmienność uzyskiwanej sprawności całkowitej układu oraz temperatury spalin na wylocie z układu. Zapisać plik pod nazwą *Odzysk_Ciepla_TG_zadanie_dodatkowe.ebs.*



Rys. 100. Model turbiny gazowej z wynikami obliczeń dla wariantu układu z *bypassem* i zadanej mocy cieplnej odbiornika równej 40,0 MW



Rys. 101. Model turbiny gazowej z wynikami obliczeń dla wariantu układu z *bypassem* i zadanej mocy cieplnej odbiornika pary technologicznej równej 50,0 MW

4. Na podstawie pliku *Odzysk_Ciepla_TG_zadanie_dodatkowe.ebs* rozbudować model elektrowni gazowej o dodatkowy odbiornik gorącej wody. W tym celu należy wprowadzić do struktury modelu układu kolejny komponent o nazwie **Heat consumer** (**Comp 35**). Jego zadaniem będzie symulacja odbioru ciepła przez wprowadzanie wymaganej temperatury wody za odbiornikiem. W ustawieniach komponentu **Heat consumer** należy wprowadzić następujące ustawienia: *Temperature setting (FT)* → *T2 given from outside : –2*, *Pressure handling (FSPECP)* → *Calculated by DP12N : 0* oraz w polu *Pressure drop (nominal) (DP12N)* wprowadzić wartość 5,0 bar. Dodatkowo za nowym komponentem odbiornika ciepła umieścić należy komponent **Measured value input** (**Comp 46**), a następnie odpowiednio skonfigurować jego ustawienia i wprowadzić wartość temperatury równą 60°C. Strukturę rozbudowanego modelu elektrociepłowni gazowej oraz uzyskane rezultaty porównać z danymi przedstawionymi na rysunku 101. Komponent **Power summarizer** (**Comp 31**) połączyć odpowiednio z linią logiczną wprowadzonego do modelu odbiornika ciepła gorącej wody. Zapisać plik pod nazwą *Odzysk_Ciepla_TG_zadanie_dodatkowe_2.ebs*.
5. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych (punkt 2), a wyniki dla poszczególnych wariantów eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*). Opracować charakterystyki układu przedstawiające zmienność uzyskiwanej sprawności całkowitej układu oraz mocy cieplnej uzyskiwanej w układzie odbiornika gorącej wody. Zapisać plik pod nazwą *Odzysk_Ciepla_TG_zadanie_dodatkowe_2.ebs.*

Podsumowanie

Przedstawione ćwiczenie ma na celu rozbudowę modelu turbiny gazowej do modelu elektrowni z układem odzysku ciepła dzięki wprowadzeniu dodatkowych elementów do struktury systemu. Wprowadzone i omówione zostały komponenty pozwalające na budowę podstawowego modelu układu skojarzonego wytwarzającego elektryczność oraz ciepło do celów technologicznych. Użytkownik powinien opanować sposób działania kontrolerów i ich zastosowania pozwalające na ograniczenie danych wejściowych wprowadzanych do modelu.

Ćwiczenie 4
Model elektrowni gazowo-parowej

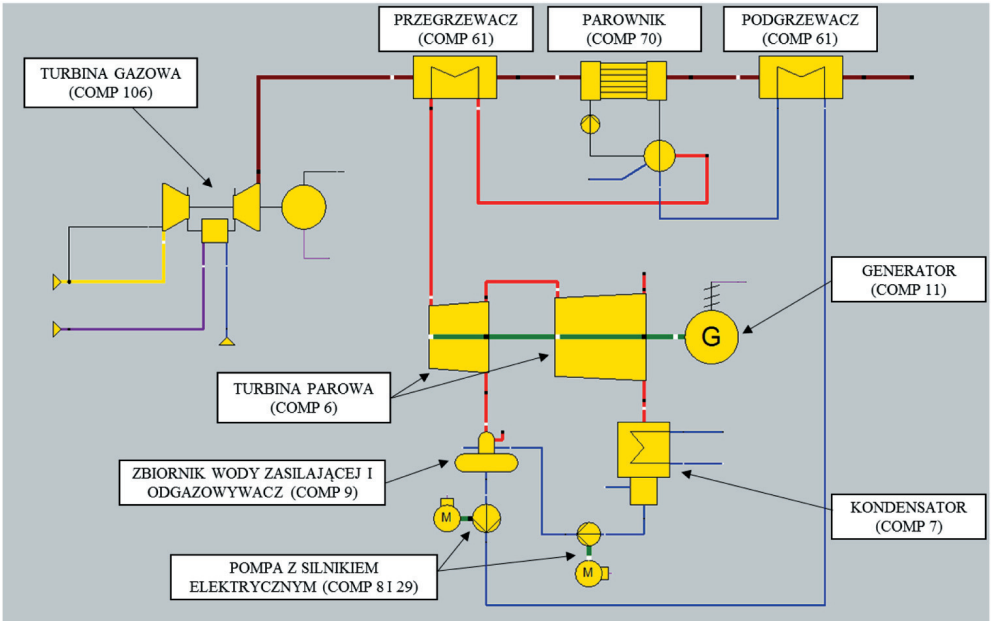
Cel ćwiczenia

Opracowanie modelu elektrowni gazowo-parowej wyposażonej w układ kotła odzysknicowego, produkującej parę o jednym stopniu ciśnienia na potrzeby pracy turbiny

parowej. Przeprowadzenie obliczeń mających na celu określenie wielkości produkcji mocy elektrycznej i cieplnej w hierarchicznym układzie gazowo-parowym, a także sprawności całkowitej obiegu dla określonego zestawu założeń i danych wejściowych.

Opis zadań do wykonania

Model bloku gazowo-parowego powinien zostać opracowany na podstawie modelu turbiny gazowej z ćwiczenia 2 (rozdz. 4). W tym celu należy przygotować model układu zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 102. Model składa się z następujących komponentów: turbina gazowa, przegrzewacz pary, parownik, podgrzewacz wody, turbina parowa, zbiornik wody zasilającej z odgazowywaczem, generator, pompa oraz silnik elektryczny. W celu przeprowadzenia obliczeń wykorzystać dane wejściowe przedstawione w tabeli 10.



Rys. 102. Przygotowany model elektrociepłowni gazowo-parowej z jednociśnieniowym kotłem odzysknicowym

Tabela 10

Dane wejściowe do modelu elektrowni gazowo-parowej

Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura pary świeżej	535,0	°C	46

Tabela 10 cd.

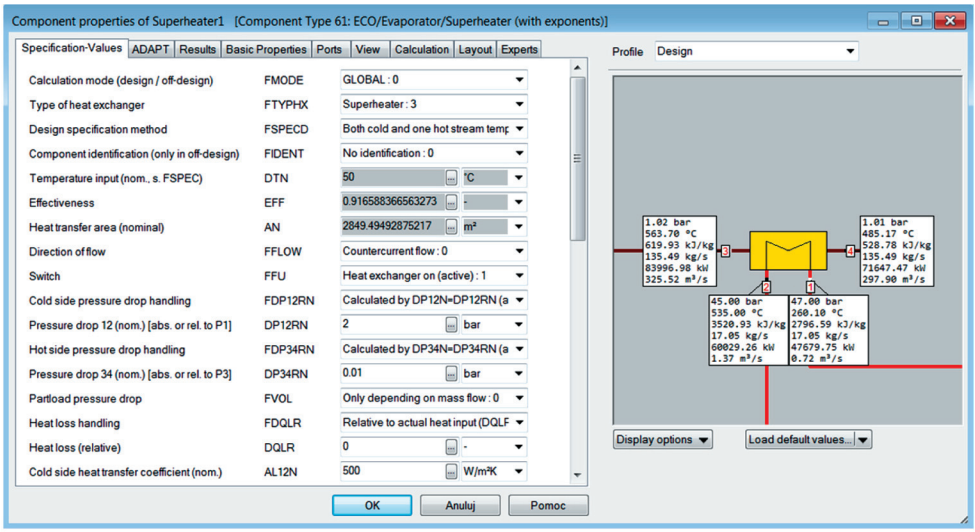
Ciśnienie pary świeżej	55,0	bar	46
Ciśnienie pary międzystopniowej	0,6	bar	46
Ciśnienie w kondensatorze	4,2	kPa	46
Temperatura wody chłodzącej na wlocie do kondensatora	15,0	°C	46
Ciśnienie wody chłodzącej na wlocie do kondensatora	5,0	bar	46
Sprawność izentropowa turbiny parowej	85,0	%	6
Sprawność izentropowa pompy	80,0	%	8
Sprawność elektryczna silnika	85,0	%	29
Sprawność mechaniczna turbiny parowej, pompy i silnika elektrycznego	99,8	%	6, 8, 29
Sprawność generatora (w części parowej)	98,5	%	106

Instrukcja wykonania modelu

1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, wczytać plik z ćwiczenia 2 (rozdz. 4) o nazwie *Turbina_Gazowa_OEM_GT_model.ebs* i zapisać otwarty plik pod nową nazwą *Elektrownia_Gazowo_Parowa_model.ebs*.
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy dodatkowe komponenty:
   - przegrzewacz pary (**ECO/Evaporator/Superheater – Comp 61**),
   - parownik (**Evaporator with steam drum – Comp 70**),
   - podgrzewacz wody (**ECO/Evaporator/Superheater – Comp 61**),
   - turbinę parową (**Steam turbine / General expander – Comp 6**),
   - zbiornik wody zasilającej z odgazowywaczem (**Feed-water tank / de-aerator / direct contact steam condenser – Comp 9**),
   - pompę (**Pump – Comp 8**),
   - silnik elektryczny (**Motor – Comp 29**).
3. Połączyć komponenty zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 102.
4. Wprowadzić dane wejściowe na podstawie zestawienia (tab. 10) oraz uzupełnić strukturę modelu o dodatkowe komponenty umożliwiające definiowanie założeń

obliczeniowych. W zakresie danych wejściowych i założeń obliczeniowych dla komponentu turbiny gazowej wykorzystać zestawienie z ćwiczenia 2 (rozdz. 4). Dla pozostałych komponentów wybrać następujące ustawienia:

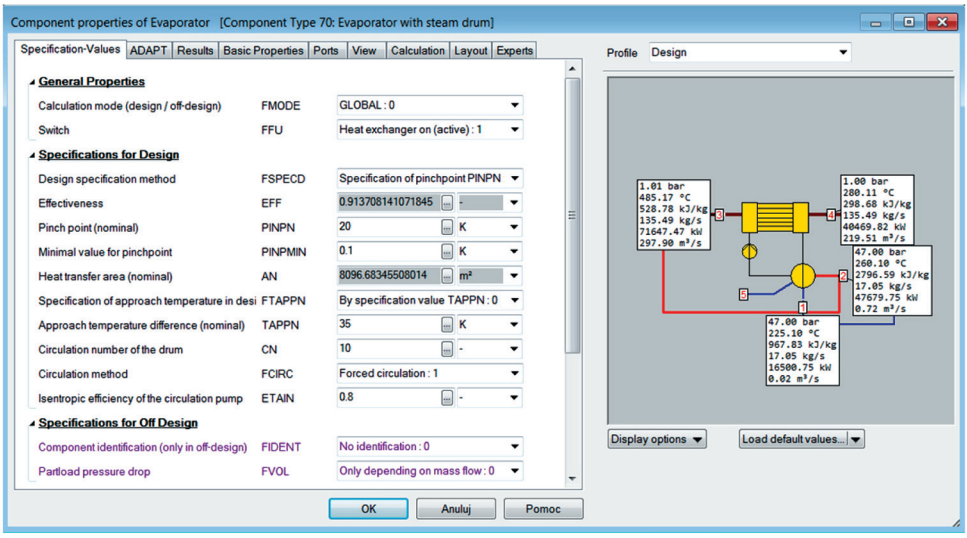
a) W komponencie przegrzewacza pary (**Comp 61**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Type of heat exchanger (FTYPHX)* → *Superheater : 3* oraz *Design specification method (FSPECD)* → *Both cold and one hot stream temperatures given : 5*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 103.



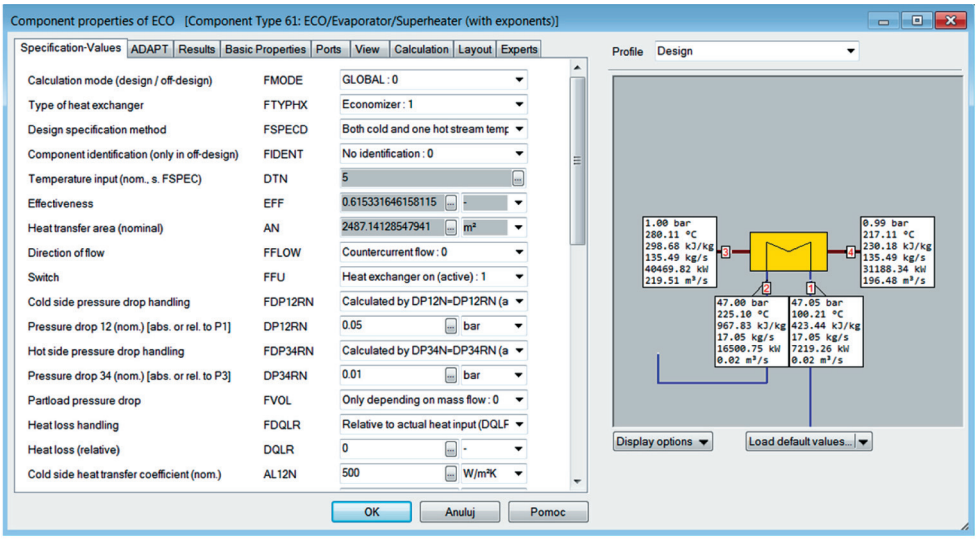
Rys. 103. Komponent przegrzewacza pary uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

b) W komponencie parownika (**Comp 70**) należy ustawić wartość parametru *Design specification method (FSPECD)* na *Specification of pinchpoint PINPN : 2*, *Pinch point (nominal) (PINPN)* równy 20 K, *Specification of approach temperature in design case (FTAPPN)* na *By specification value TAPPN : 0* oraz *Approach temperature difference (nominal) (TAPPN)* równy 35 K. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 104.

c) W komponencie podgrzewacza wody (**Comp 61**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Type of heat exchanger (FTYPHX)* → *Economizer : 1* oraz *Design specification method (FSPECD)* → *Both cold and one hot stream temperatures given : 5*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 105.

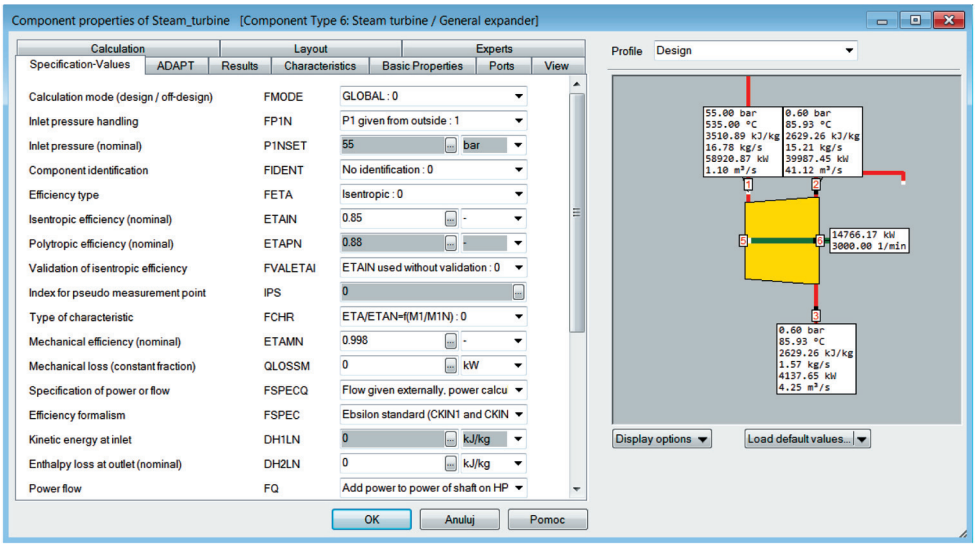


Rys. 104. Komponent parownika uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



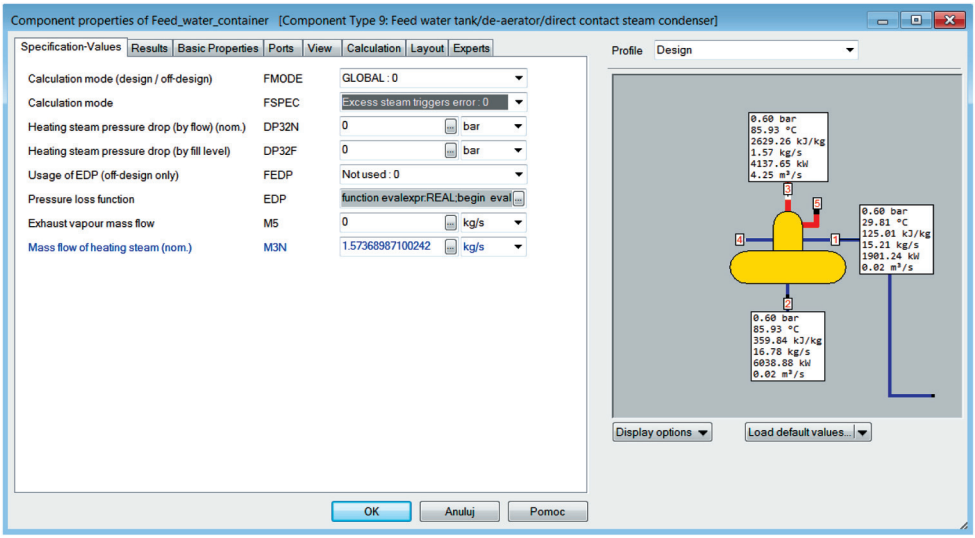
Rys. 105. Komponent podgrzewacza wody uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

d) W obu komponentach turbiny parowej (**Comp 6**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Inlet pressure handling (FP1N)* → *P1 given from outside : 1* oraz *Efficiency type (FETA)* → *Isentropic : 0*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 106.



Rys. 106. Komponent turbiny parowej uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

e) W komponencie zbiornika wody zasilającej z odgazowywaczem (**Comp 9**) należy ustawić wartość parametru *Calculation mode (FSPEC)* na *Excess steam tiggers error : 0* oraz *Specification of mass flow and pressure (FSPECP)* na *M and P given : –1*. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 107.



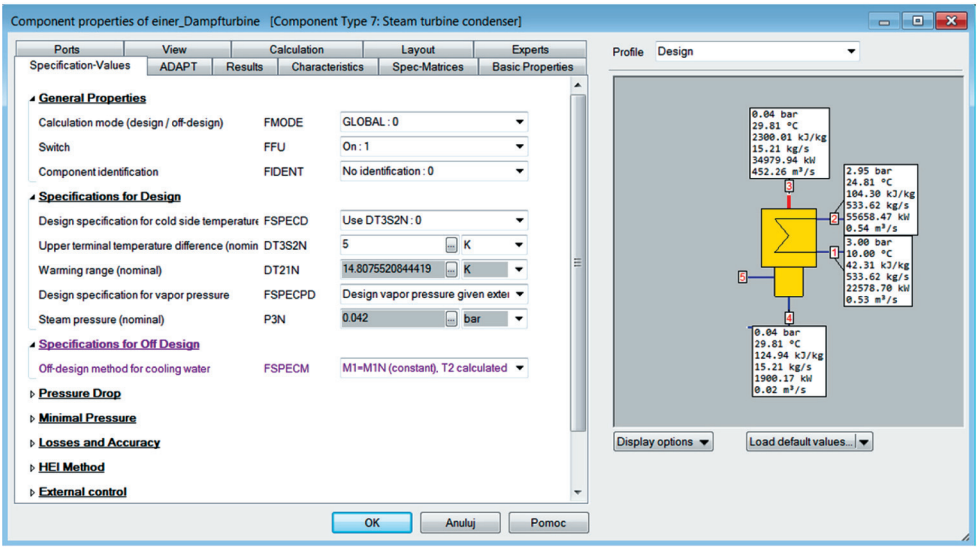
Rys. 107. Komponent zbiornika wody zasilającej uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

f) Dla pomp (**Comp 8**) należy ustawić wartość parametru *Calculation mode (FCALC)* na *Simple mode : 0* oraz *Specification of mass flow and pressure (FSPECP)* na *M and P given : –1*.

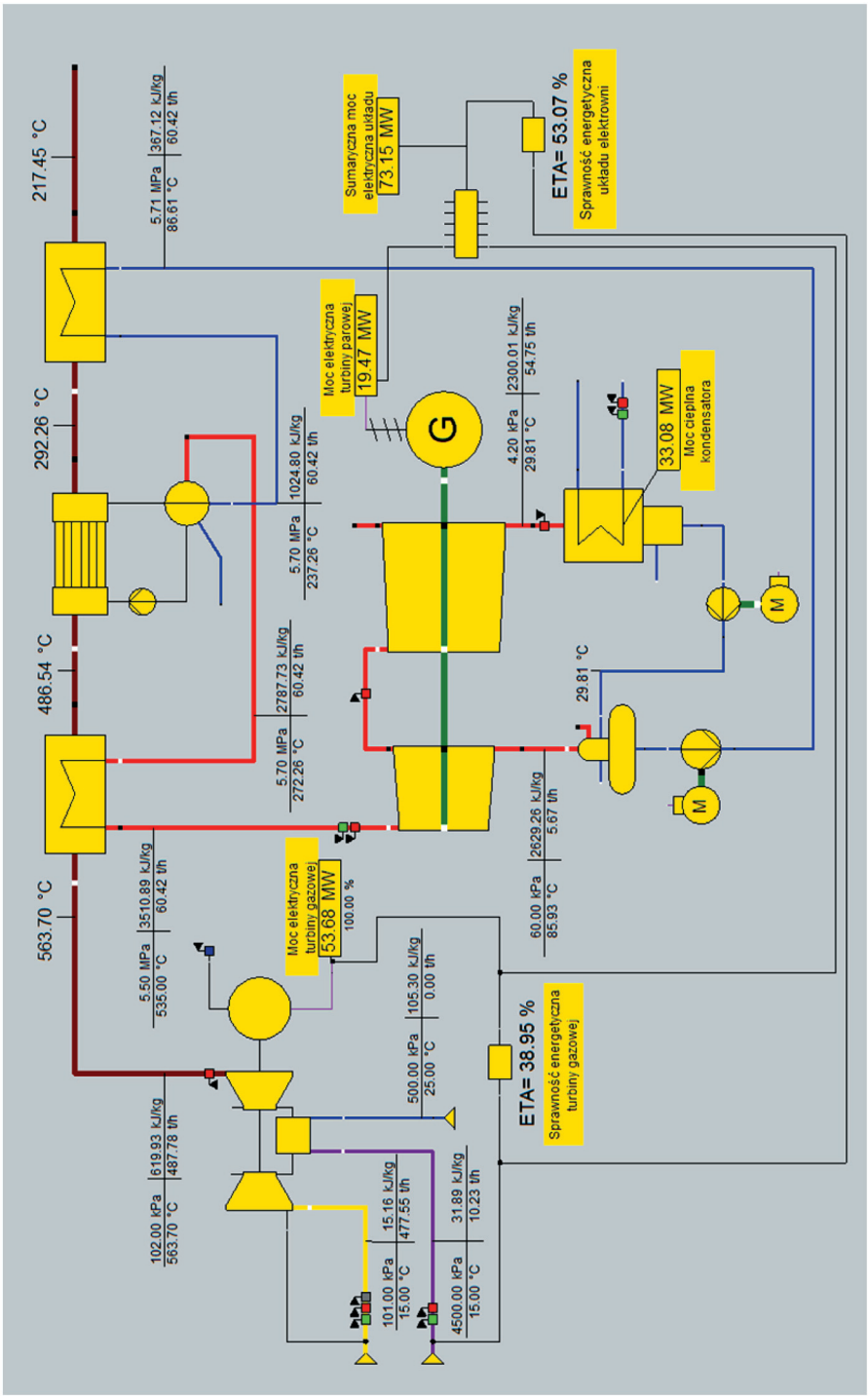
g) W komponentach silnika elektrycznego (**Comp 29**) należy ustawić wartość parametru *Specification of electric efficiency (FETAEN)* na *By specification value ETAEN : 0*.

h) W komponencie skraplacza (**Comp 7**) należy ustawić wartość parametru *Design specification for cold side temperatures (FSPECD)* na *Use DT3S2N : 0* i wprowadzić wartość 5 K. Dla parametru *Design specification for vapor pressure (FSPECPD)* ustawić wartość *Design vapor pressure given externally (in off-desing as start value : –1*). Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 108. Zapisać plik pod nazwą *Elektrownia_Gazowo_Parowa_model.ebs*.

5. Przeprowadzić obliczenia (przycisk *Simulation* lub klawisz F9) i uzupełnić model o elementy pozwalające na prezentację wybranych parametrów (*Insert value--cross*). Wyświetlić uzyskaną moc elektryczną turbiny gazowej oraz moc na generatorze turbiny parowej, moc cieplną skraplacza oraz wartości temperatury, ciśnienia, entalpi oraz przepływu masowego w charakterystycznych punktach obiegu zgodnie z rysunkiem 109. Dodatkowo należy wyznaczyć sprawność energetyczną układu turbiny gazowej oraz sprawność energetyczną układu elektrowni gazowo-parowej.
6. Zapisać plik jako *Elektrownia_Gazowo_Parowa_wyniki.ebs*, a wyniki obliczeń eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*).



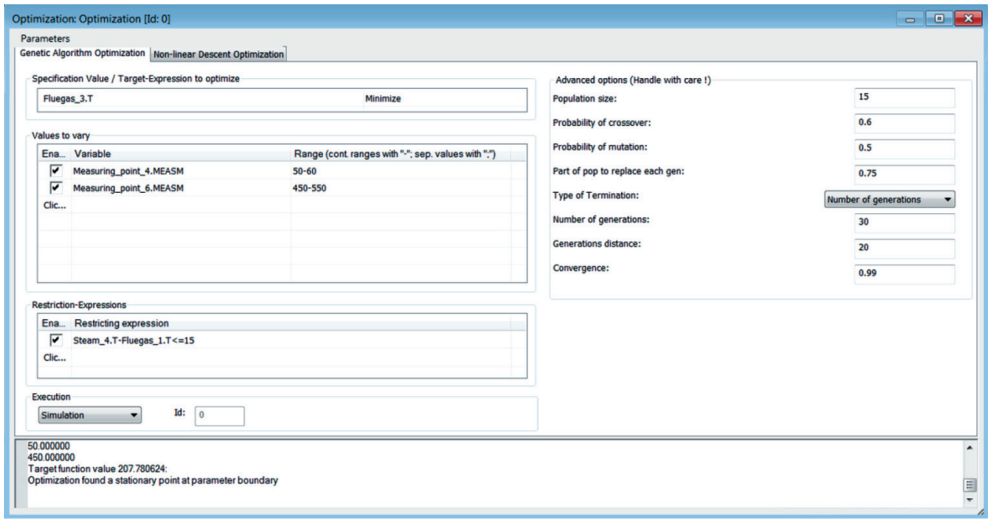
Rys. 108. Komponent skraplacza uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



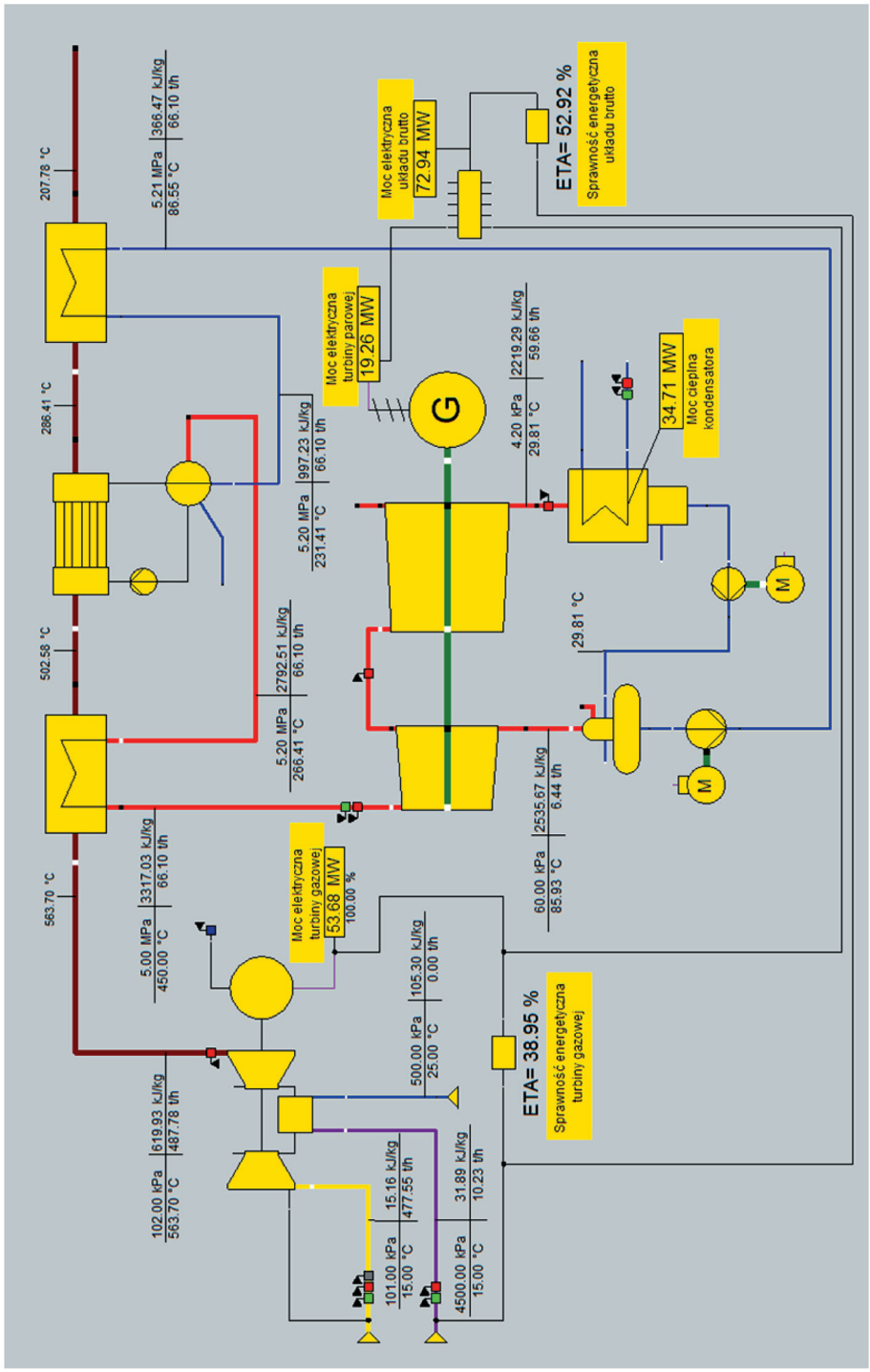
Rys. 109. Model elektrowni gazowo-parowej z wynikami obliczeń dla opracowanych danych wejściowych

Zadanie dodatkowe

1. Na podstawie modelu *Elektrownia_Gazowo_Parowa_model.ebs* przeprowadzić optymalizację parametrów pary świeżej (ciśnienia oraz temperatury) na wlocie do turbiny parowej za pomocą dodatku EbsOptimize. W tym celu należy przejść do zakładki *Calculation* znajdującej się na pasku z narzędziami, następnie wybrać opcję *Optimization*. Innym sposobem uruchomienia opcji optymalizacji jest naciśnięcie przycisku F10 na klawiaturze. Po otworzeniu się okna konfiguracji założeń optymalizacji domyślnie aktywną opcją jest algorytm genetyczny. Dostępny jest również inny algorytm optymalizacji – nieliniowa metoda gradientowa. W polu *Specification Value / Target-Expression to optimize* należy wprowadzić parametr, którego wartość podlegać będzie optymalizacji – w tym przypadku należy wybrać linię spalin na wylocie z kotła odzysknicowego, wskazać parametr temperatury spalin i następnie wybrać opcję minimalizacji tej wartości (*Minimize*). W polu *Values to vary* należy wskazać punkty pomiarowe na linii pary świeżej z przegrzewacza pary, w pierwszym wierszu wybrać pomiar ciśnienia i w polu *Range* wprowadzić dopuszczalny zakres zmienności tej wartości – wpisać 50–60. W drugim wierszu wybrać pomiar temperatury i wprowadzić przedział zmienności parametru 450–550. Następnie przejść do obszaru *Restriction-Expressions* i wprowadzić formułę określającą minimalną różnicę pomiędzy temperaturą spalin wlotowych do kotła odzysknicowego a temperaturą pary świeżej do turbiny parowej nie mniejszą niż 15 K. Dla dowolnych oznaczeń w modelu formuła ta może mieć następującą postać: *Steam_4.T-Fluegas_1.T<=15*. Z prawej strony okna (rys. 110) dostępny jest również szereg ustawień samego algorytmu genetycznego (np. wielkość populacji, prawdopodobieństwo krzyżowania i mutacji) – zachować domyślne ustawienia. Zapisać plik jako *Elektrownia_Gazowo_Parowa_zadanie_dodatkowe.ebs.*



Rys. 110. Okno konfiguracji obliczeń optymalizacyjnych w dodatku EbsOptimize



Rys. 111. Model elektrowni gazowo-parowej z wynikami obliczeń po przeprowadzeniu optymalizacji parametrów pary świeżej

2. Przeprowadzić obliczenia, klikając przycisk *Start*. Po zakończeniu obliczeń optymalizacyjnych powinien pojawić się komunikat *Optimization found a stationary point at parameter boundary*. Jeżeli pojawił się inny komunikat, należy sprawdzić ponownie wprowadzone ustawienia. Po zakończeniu obliczeń nacisnąć *Close* i przejść do ekranu głównego modelu symulacyjnego. Uzyskane rezultaty optymalizacji modelu elektrowni gazowo-parowej porównać z rysunkiem 111. Zapisać plik pod nazwą *Elektrownia_Gazowo_Parowa_zadanie_dodatkowe.ebs.*, a wyniki obliczeń eksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml***.**
3. Przejść ponownie do zakładki optymalizacji i ponownie przeprowadzić obliczenia, przyjmując jako funkcję celu maksymalizację sprawności całkowitej układu. Pozostałe ustawienia oraz zakresy zmienności parametrów pozostawiamy bez zmian. Porównać uzyskane rezultaty z wynikami obliczeń dla poprzednich wariantów.
4. Zapisać plik pod nazwą *Elektrownia_Gazowo_Parowa_zadanie_dodatkowe2.ebs* i wyeksportować wyniki obliczeń z wykorzystaniem dodatku *EBShtml*.

Podsumowanie

Celem ćwiczenia było opracowanie modelu elektrowni gazowo-parowej z wykorzystaniem zaawansowanego modelu turbiny gazowej. Opracowany w ramach ćwiczenia model może stanowić podstawę do bardziej dokładnych analiz wskaźników energetycznych i parametrów termodynamicznych obiegu w układach zbudowanych z różnych rodzajów turbin gazowych. Omówiony został sposób korzystania z dodatkowego modułu obliczeniowego EbsOptimize, pozwalającego na przeprowadzanie obliczeń optymalizacyjnych dla zdefiniowanych przez użytkownika parametrów i struktury modelu. Użytkownik powinien opanować sposób działania komponentów wchodzących w skład obiegu cieplnego elektrowni gazowo-parowej oraz poznać budowę wymienników ciepła tworzących układ kotła odzysknicowego.

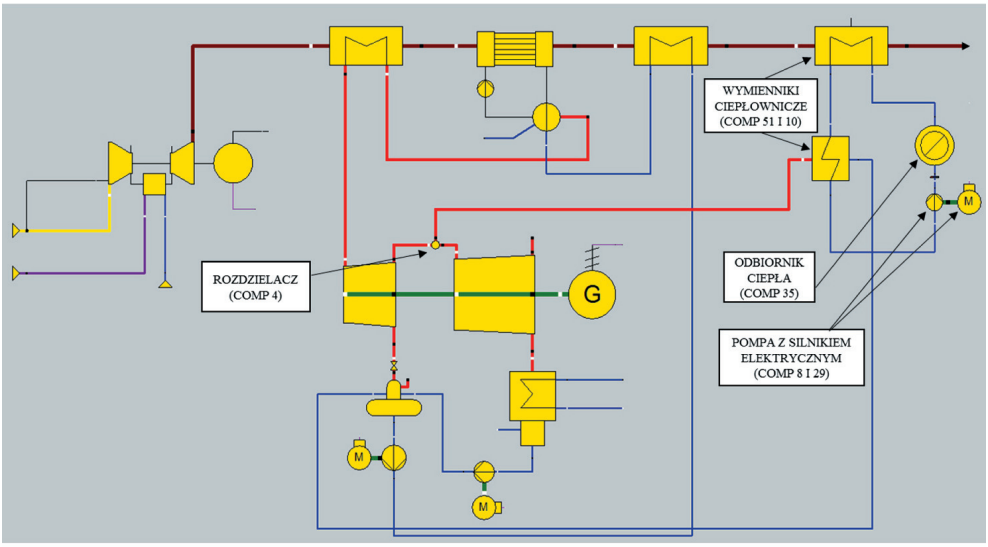
Ćwiczenie 5
Model elektrociepłowni gazowo-parowej

Cel ćwiczenia

Opracowanie modelu elektrociepłowni gazowo-parowej zawierającego kocioł odzyskowy produkujący parę na jednym poziomie ciśnienia, która zasila turbinę parową, oraz wyposażonego w układ ciepłowniczy podgrzewający wodę sieciową, składający się z dwóch wymienników: zasilanego spalinami wylotowymi i zasilanego parą pobieraną z przelotni pomiędzy częścią wysokoprężną a niskoprężną turbiny parowej. Przeprowadzenie obliczeń pozwalających na określenie wielkości mocy elektrycznej i cieplnej produkowanej w analizowanym układzie, a także wyznaczenie sprawności całkowitej obiegu dla określonego zestawu założeń i danych wejściowych.

Opis zadań do wykonania

Na podstawie opracowanego modelu elektrowni gazowo-parowej z ćwiczenia 4 (rozdz. 4) należy przygotować model układu zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 112. Model składać się będzie z następujących komponentów: turbina gazowa, przegrzewacz pary, parownik, podgrzewacz wody, turbina parowa, zbiornik wody zasilającej z odgazowywaczem, układ wymienników ciepłowniczych, odbiornik ciepła, generator, pompa wraz silnikami elektrycznymi. W celu przeprowadzenia obliczeń wykorzystać dane wejściowe przedstawione w tabeli 11.



Rys. 112. Model elektrociepłowni gazowo-parowej z jednociśnieniowym kotłem odzysknicowym i dwustopniowym podgrzewem wody sieciowej

Tabela 11

Dane wejściowe do modelu elektrowni gazowo-parowej

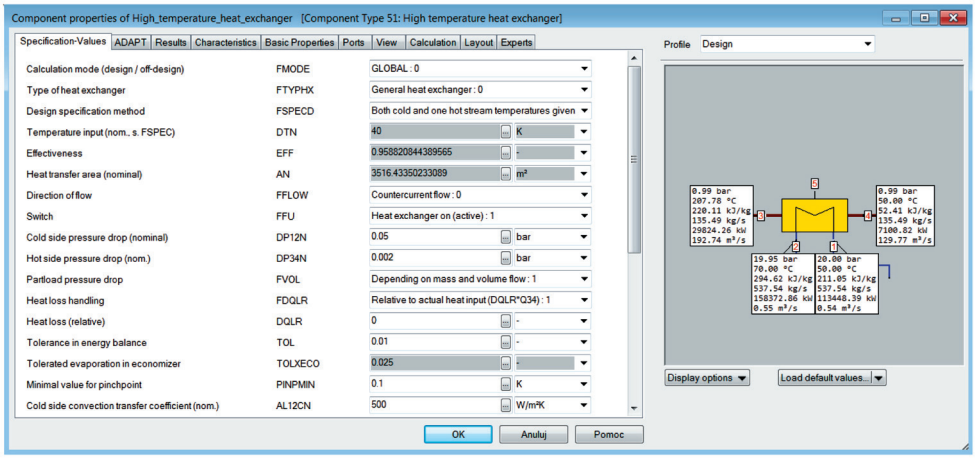
Parametr	Wartość	Jednostka	Numer komponentu
Temperatura wody sieciowej – zasilanie	90,0	°C	46
Temperatura wody sieciowej – powrót	50,0	°C	46
Temperatura wody sieciowej za spalinowym wymiennikiem ciepłowniczym	70,0	°C	46
Ciśnienie wody sieciowej – powrót	20,0	bar	46
Spadek ciśnienia wody sieciowej	5,0	bar	35

Tabela 11 cd.

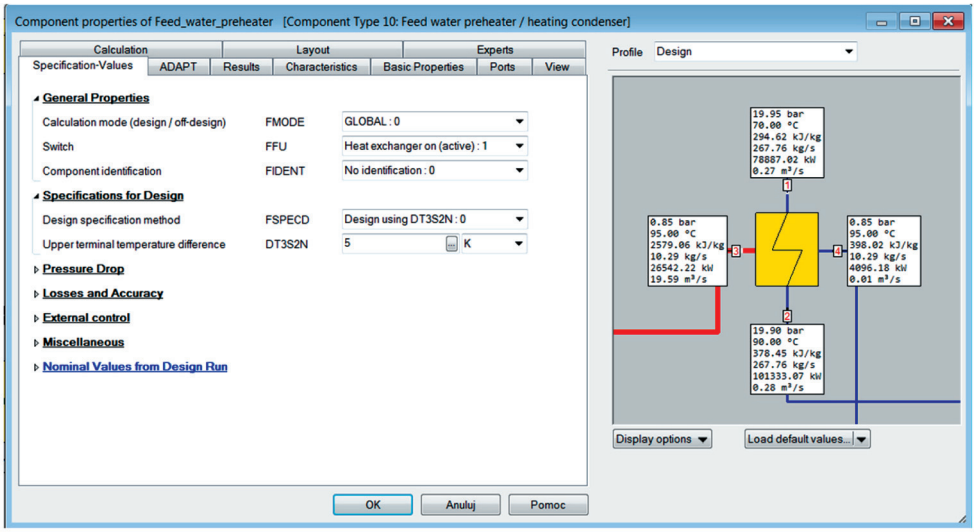
Moc cieplna układu ciepłowniczego	45,0	MW	46
Sprawność izentropowa pompy	80,0	%	8
Sprawność elektryczna silnika	85,0	%	29
Sprawność mechaniczna pompy i silnika elektrycznego	99,8	%	8, 29

Instrukcja wykonania modelu

1. Otworzyć program Ebsilon®Professional, wczytać plik z ćwiczenia 2 (rozdz. 4) o nazwie *Elektrownia_Gazowo_Parowa_zadanie_dodatkowe.ebs* i zapisać otwarty plik pod nową nazwą *Elektrocieplownia_G-P_model.ebs*.
2. Wybrać i umieścić na obszarze pracy dodatkowe komponenty:
   – spalinowy wymiennik ciepłowniczy (**High-temperature heat exchanger – Comp 51**),
   – parowy wymiennik ciepłowniczy (**Feed water preheater / heating condenser – Comp 10**),
   – odbiornik ciepła (**Heat consumer – Comp 35**),
   – rozdzielacz (**Splitter – Comp 4**),
   – pompa (**Pump – Comp 8**),
   – silnik elektryczny (**Motor – Comp 29**).
3. Przygotować model układu elektrociepłowni gazowo-parowej i odpowiednio połączyć komponenty zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 112.
4. Wprowadzić dane wejściowe zgodnie z zestawieniem z tabeli 11 oraz uzupełnić strukturę modelu o dodatkowe komponenty umożliwiające definiowanie założeń obliczeniowych. W zakresie danych wejściowych i założeń obliczeniowych dla komponentu turbiny gazowej wykorzystać zestawienie z ćwiczenia 2 (rozdz. 4):
   a) W komponencie spalinowego wymiennika ciepłowniczego (**Comp 51**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Type of heat exchanger (FTYPHX)* → *General heat exchanger : 0* oraz *Design specification method (FSPECD)* → *Both cold and one hot stream temperatures given : 5*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 113.
   b) W komponencie parowego wymiennika ciepłowniczego (**Comp 10**) należy ustawić wartość parametru *Design specification method (FSPECD)* na *Design using DT3S2N : 0* oraz *Upper terminal temperature difference (DT3S2N)* na 5 K. Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 114.

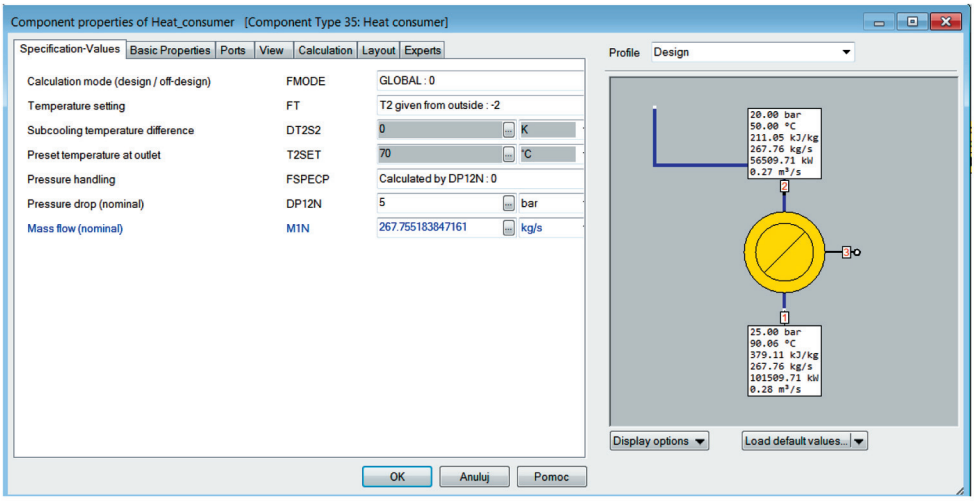


Rys. 113. Komponent spalinowego wymiennika ciepłowniczego uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



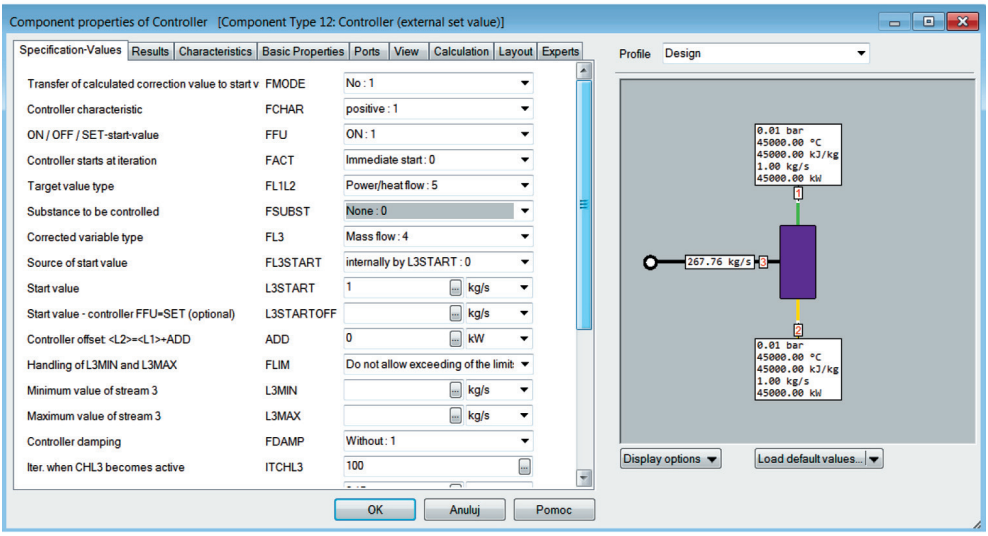
Rys. 114. Komponent parowego wymiennika ciepłowniczego uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

c) W komponencie odbiornika ciepła (**Comp 35**) należy wprowadzić następujące ustawienia: *Temperature setting (FT)* → *T2 given from outside : –2* oraz *Pressure handling (FSPECP)* → *Calculated by DP12N : 0*. Pozostałe ustawienia obliczeniowe są takie same jak na rysunku 115. Przed komponentem odbiornika ciepła wprowadzić separator logiczny (**Separator (logical) – Comp 80**) oraz ustawić parametr *Type of separation (FSPEC)* na *Mass flow (frequency) : 4*.

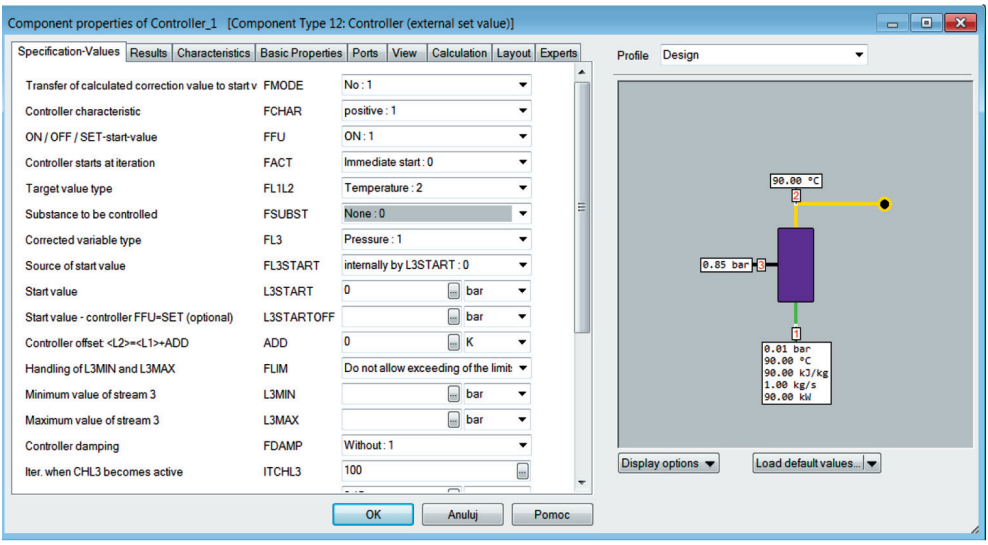


Rys. 115. Komponent odbiornika ciepła uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

d) Do struktury modelu należy wprowadzić dwukrotnie dodatkowy komponent: **Controller (external set value) (Comp 12)**. Pierwszy z kontrolerów ma za zadanie określenie strumienia masowego przepływu wody sieciowej przez odbiornik ciepła dla zadanej wartości mocy cieplnej układu. W tym celu należy zaznaczyć następujące ustawienia: *Controller characteristic (FCHAR)* → *Positive : 1*, *Target value type (FL1L2)* → *Power/heat flow : 5*, *Corrected variable type (FL3)* → *Mass flow : 4* oraz *Source of start value* → *Internally by L3START : 0*. Należy pamiętać, aby na linii zielonej *Target value (1)* ustawić komponent umożliwiający wprowadzenie mocy cieplnej (**Measured value input – Comp 46**). Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 116. Drugi z kontrolerów ma za zadanie określenie wartości ciśnienia pary zasilającej wymiennik ciepłowniczy dla zadanej wartości temperatury wody sieciowej na wylocie z wymiennika. W tym celu należy zaznaczyć następujące ustawienia: *Controller characteristic (FCHAR)* → *Positive : 1*, *Target value type (FL1L2)* → *Temperature : 2*, *Corrected variable type (FL3)* → *Pressure : 1* oraz *Source of start value* → *Internally by L3START : 0*. Należy pamiętać, aby również w tym przypadku na linii zielonej *Target value (1)* ustawić komponent umożliwiający wprowadzenie temperatury wody (**Measured value input – Comp 46**). Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z rysunkiem 117. Przy zastosowaniu tego komponentu należy wykluczyć możliwość zadawania ciśnienia na linii pary pomiędzy częścią wysokoprężną a niskoprężną (usunąć komponent 46 lub w ustawieniach zmienić wartość parametru *Switch (FFU)* na *Off : 0*).



Rys. 116. Komponent kontrolera mocy cieplnej uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia



Rys. 117. Komponent kontrolera temperatury wody sieciowej na zasilaniu sieci ciepłowniczej uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

e) Dla pompy (**Comp 8**) należy ustawić wartość parametru *Calculation mode (FCALC)* na *Simple mode : 0* oraz *Specification of mass flow and pressure (FSPECP)* na *M and P given : –1*.

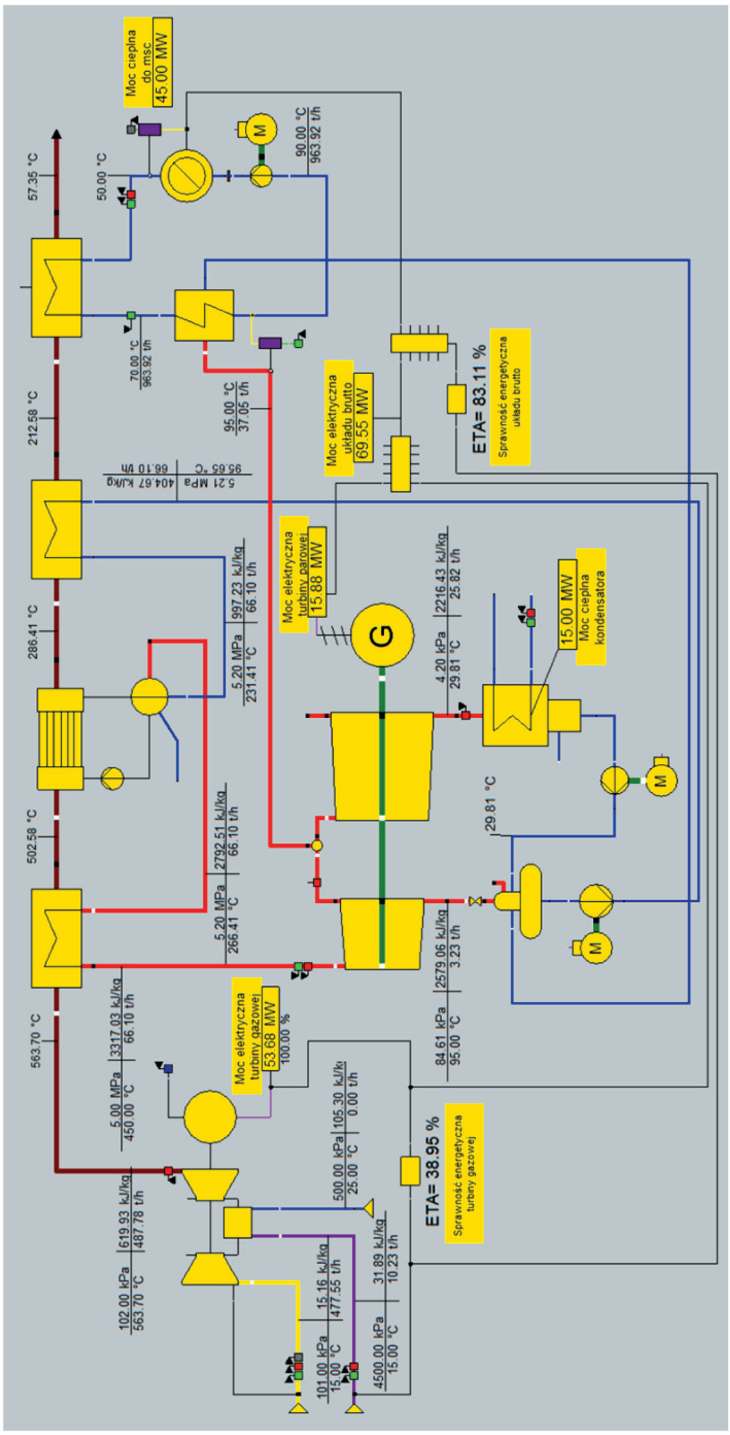
f) W komponencie silnika elektrycznego (**Comp 29**) należy ustawić wartość parametru *Specification of electric efficiency (FETAEN)* na *By specification value ETAEN : 0*.

g) Zapisać model pod nazwą *Elektrocieplownia_G-P_model.ebs.*

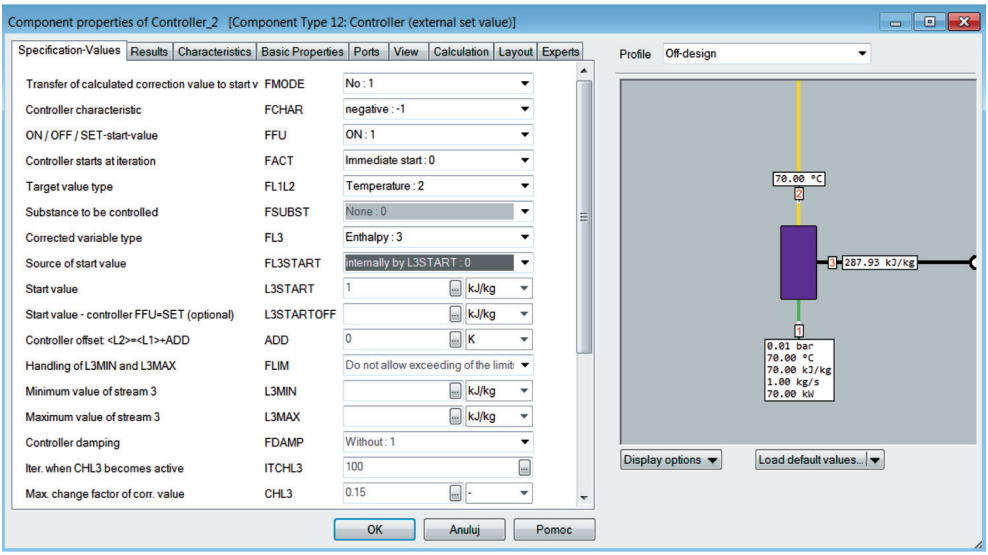
5. Przeprowadzić obliczenia (przycisk *Simulation* lub klawisz F9) i uzupełnić model o elementy pozwalające na prezentację wybranych parametrów (opcja *Insert Value-Cross*). Wyświetlić uzyskaną moc elektryczną turbiny gazowej oraz moc cieplną kondensatora oraz układu ciepłowniczego na generatorze turbiny parowej, a także wartości temperatury, ciśnienia, entalpi oraz przepływu masowego w charakterystycznych punktach obiegu zgodnie z rysunkiem 118. Dodatkowo należy wyznaczyć sprawność energetyczną układu turbiny gazowej oraz sprawność energetyczną układu elektrociepłowni gazowo-parowej.
6. Zapisać plik pod nazwą *Elektrocieplownia_G-P_wyniki.ebs*, a wyniki obliczeń wyeksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*).

Zadanie dodatkowe

1. Wykorzystując plik *Elektrocieplownia_G-P_wyniki.ebs* należy rozbudować model układu elektrociepłowni gazowo-parowej o dodatkowy kontroler pozwalający na wprowadzanie temperatury spalin na wylocie z kotła odzysknicowego (za spalinowym wymiennikiem ciepłowniczym). Do struktury modelu należy wprowadzić komponent **Controller (external set value)** (**Comp 12**) (rys. 119). Celem jego działania jest wyznaczenie temperatury wody sieciowej na wylocie ze spalinowego wymiennika ciepłowniczego dla zadanej wartości temperatury spalin wylotowych z układu kotła odzysknicowego. W pierwszym kroku należy utworzyć nowy profil obliczeniowy i nadać mu nazwę *Off-design*. Zapisać plik pod nazwą *Elektrocieplownia_G-P_zadanie_dodatkowe.ebs*. Wprowadzić kontroler do modelu zgodnie ze schematem na rysunku 120. W ustawieniach kontrolera należy wprowadzić następujące parametry: *Controller characteristic (FCHAR)* → *negative : –1*, *Target value type (FL1L2)* → *Temperature : 2*, *Corrected variable type (FL3)* → *Enthalpy : 3* oraz *Source of start value* → *Internally by L3START : 0*. Należy pamiętać, aby na linii zielonej *Target value (1)* ustawić komponent umożliwiający wprowadzenie mocy cieplnej (**Measured value input – Comp 46**). Pozostałe ustawienia wprowadzić zgodnie z danymi na rysunku 119. Dla komponentów reprezentujących przegrzewacz pary oraz spalinowy wymiennik ciepłowniczy należy ustawić parametr *Calculation mode (design/off-design) (FMODE)* na wartość *Local design : –1*. Działanie to pozwoli na usunięcie błędów i komunikatów ostrzegających przy realizacji obliczeń w trybie *off-design* dla opracowanego modelu.



Rys. 118. Model elektrociepłowni gazowo-parowej z wynikami symulacji dla opracowanych danych wejściowych

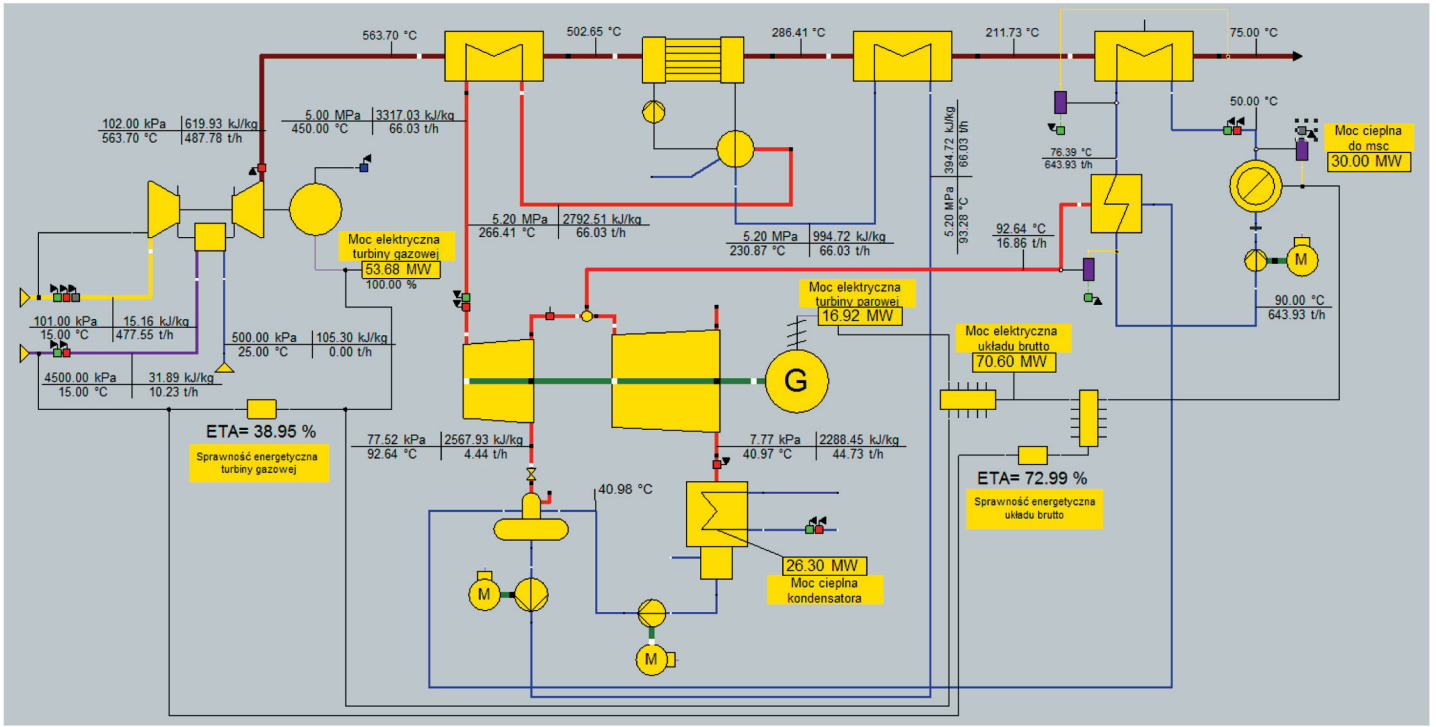


Rys. 119. Komponent kontrolera temperatury spalin wylotowych uzupełniony o dane wejściowe i ustawienia

2. Utworzyć trzy nowe profile obliczeniowe celem przeprowadzenia symulacji układu w trybie *off-design* dla zmiennej temperatury spalin na wylocie z układu. Utworzonym profilom nadać odpowiednio nazwy: *T_75C*, *T_100C* oraz *T_125C*.
3. Przeprowadzić obliczenia dla wszystkich zdefiniowanych profili obliczeniowych, a wyniki dla poszczególnych wariantów wyeksportować z wykorzystaniem funkcji *EBShtml* (*File* → *Export* → *EBShtml*). Na podstawie uzyskanych wyników opracować charakterystyki układu przedstawiające zmianę sprawności całkowitej układu w funkcji mocy elektrycznej układu oraz przepływu pary do parowego wymiennika ciepłowniczego z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego, np. MS Excel.
4. Zapisać plik *Elektrocieplownia_G-P_zadanie_dodatkowe.ebs.*

Podsumowanie

Wykonanie ćwiczenia pozwoliło na opracowanie modelu elektrociepłowni gazowo-parowej przez rozbudowę i wprowadzenie dodatkowych komponentów do modelu przygotowanego wcześniej. Użytkownik powinien opanować sposób działania komponentów wchodzących w skład obiegu cieplnego elektrociepłowni gazowo-parowej. Szczegółowo przedstawione zostały różne możliwości wykorzystania kontrolerów celem określania zależności pomiędzy daną grupą parametrów termodynamicznych.



Rys. 120. Model elektrociepłowni gazowo-parowej z wynikami obliczeń (wariant *T_75C*)

Literatura

[4.1] Bartnik R.: Elektrownie i elektrociepłownie gazowo-parowe. Efektywność energetyczna i ekonomiczna. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.

[4.2] Kotowicz J.: Elektrownie gazowo-parowe. Wydawnictwo Kaprint, Lublin 2008.

[4.3] Miller A.: Turbiny gazowe i układy parowo-gazowe. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1984.

[4.4] Badur J.: Numeryczne modelowanie zrównoważonego spalania w turbinach gazowych. Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 2003.

[4.5] Badyda K., Miller A.: Energetyczne turbiny gazowe oraz układy z ich wykorzystaniem. Wydawnictwo Kaprint, Lublin 2011.

[4.6] Chmielniak T., Rusin A., Czwiertnia K.: Turbiny gazowe. Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wydawnictwo PAN, Wrocław 2001.

[4.7] Çengel Y., Boles M., Kanoglu M.: Thermodynamics. An engineering approach. 9th edition. McGraw-Hill, New York 2019.

[4.8] Rao A.D. (ed.): Combined cycle systems for near-zero emission power generation. Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK 2012.

[4.9] Pauken M.: Termodynamika dla bystrzaków. Tłum. Sielicki L., Wydawnictwo Helion, Gliwice 2017.

5. Rozwiązania inżynierskie i systemy informatyczne wykorzystujące program STEAG Ebsilon®Professional

Modelując obiegi i złożone układy energetyczne z wykorzystaniem oprogramowania Ebsilon, można wytypować konkretny cel i zakres parametrów, które będą monitorowane, optymalizowane, walidowane itp. Aby osiągnąć taki efekt, niezbędne jest rozbudowanie opracowanego modelu i zaimplementowanie go jako głównego silnika narzędzia informatycznego, które oprócz modelu termodynamicznego powinno być wyposażone w odpowiednie bazy danych, protokoły pozwalające na szybkie przesyłanie danych wejściowych oraz wyników, jak również spersonalizowany interfejs uwypuklający najważniejsze wyniki. Poniżej zostały wymienione i krótko scharakteryzowane narzędzia wykorzystujące modelowanie w programie Ebsilon.

5.1. SR::EPOS – zarządzanie sprawnością i optymalizacja

Moduł SR::EPOS [5.1] jest systemem przeznaczonym do monitorowania parametrów techniczno-ekonomicznych procesów zachodzących w układach elektrowni i elektrociepłowni. Działanie systemu w trybie rzeczywistym (*on-line*) pozwala na detekcję zmian w procesie technologicznym i wskazanie w zakresie bieżących parametrów eksploatacyjnych odstępstw od wartości referencyjnych. Wykrycie tych zmian umożliwia określenie wielkości dodatkowych kosztów powstających w wyniku pracy układu w warunkach odbiegających od optymalnych. Informacja na temat zmian zachodzących w procesie technologicznym pozwala na zaplanowanie odpowiednich działań korygujących, a także precyzyjne wskazanie obszarów, które powinny zostać poddane zabiegom remontowo-modernizacyjnym. Moduł SR::EPOS bazuje na modelu symulacyjnym układu, który umożliwia wykonywanie obliczeń i analiz typu *what-if*. Moduł ten wykorzystuje wartości pomiarowe pobierane w trybie rzeczywistym z systemu pomiarowego układu energetycznego. Dzięki wykorzystaniu modelu symulacyjnego możliwe jest dowolne korygowanie wartości wybranych parametrów procesu technologicznego i prowadzenie symulacji wpływu wprowadzanych zmian na wybrane wskaźniki

techniczno-ekonomiczne. Moduł SR::EPOS znajduje zastosowanie głównie przy optymalizacji ilości wody chłodzącej w kondensatorach podczas pracy z obciążeniem innym niż nominalne, optymalizacji działania systemów czyszczenia powierzchni ogrzewalnych w kotłach węglowych wykorzystujących zdmuchiwacze sadzy, a także przy optymalizacji pracy układów młynowych.

5.2. SR::SPC – analityka predyktywna

W celu analizy jakościowej procesów zachodzących w układzie elektrowni lub w wybranym jej elemencie opracowany został moduł SR::SPC [5.2]. Umożliwia on wyznaczanie normowanych parametrów pracy układu, które określane są terminem KPI (*key performance indicator* – kluczowy wskaźnik efektywności). Obliczanie zmiennej wartości referencyjnej wybranych wskaźników KPI przeprowadzane jest za pomocą sieci neuronowych i przeznaczonych do tego algorytmów matematycznych, a w niektórych przypadkach z uwzględnieniem modeli termodynamicznych. Procedura obliczeniowa zastosowana w module SR::SPC jest szczególnie przydatna do monitorowania wskaźników KPI ze względu na potwierdzoną wysoką jakość uzyskiwanych wyników i niską podatność systemu na zakłócenia powodowane przez tzw. fałszywe alarmy. Opracowany system monitorowania wskaźników KPI umożliwia wczesne wykrywanie zmian zachodzących w procesie technologicznym oraz detekcję przewidywanych awarii i uszkodzeń wybranych urządzeń układu technologicznego. Zastosowanie modułu umożliwiającego prowadzenie predykcyjnego utrzymania ruchu (*predictive maintenance*) pozwala na realne oszczędności finansowe i zwiększenie bezpieczeństwa pracy instalacji.

5.3. SR::SPC ML – predykcja *machine learning*

Moduł SR::SPC ML [5.3, 5.4] stanowi rozwinięcie modułu SR::SPC, które zawiera dodatkowy element, jakim jest moduł pod nazwą *Detekcja anomalii*. Moduł SR::SPC w połączeniu z systemem SR::SPC ML stanowi kompleksowe rozwiązanie pozwalające na dokonywanie analiz predykcyjnych w zakresie zarządzania i utrzymania ruchu w układach technologicznych. Zdefiniowane w module SR::SPC kluczowe wskaźniki efektywności (KPI) opisują wybrane elementy instalacji i z wysoką precyzją informują o wszelkich możliwych zmianach lub potencjalnych awariach. Istnieje jednak wiele parametrów, które nie są ujęte w zakresie KPI, co powoduje konieczność określania wskaźników dla każdego elementu instalacji. W celu detekcji zmian zachodzących w procesie technologicznym lub zakłóceń pracy danego urządzenia układu energetycznego wymagane jest przeprowadzenie analizy znacznie większej liczby parametrów procesowych.

Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie systemu *Detekcja anomalii*, który stanowi tzw. odcisk palca instalacji. Moduł SR::SPC ML analizuje przebiegi i zmiany kilku tysięcy parametrów pracy instalacji, a następnie wyznaczane są wskaźniki KPI dla każdego mierzonego parametru. W trakcie pracy system SR::SPC ML dostarcza użytkownikowi w trybie *on-line* informację, czy dany parametr odpowiada warunkom prawidłowej pracy, czy odbiega od przyjętych zakresów dopuszczalnych wartości.

5.4. SR::BCM – optymalizacja zdmuchiwaczy

System SR::BCM (Boiler Cleaning Management System) [5.5] wykorzystuje wartości pomiarowe, aby na podstawie tych danych precyzyjnie określać bieżący stan techniczny kotła. Moduł ten bazuje na szczegółowym modelu termodynamicznym kotła parowego, który stosowany jest jako silnik obliczeniowy do wyznaczania niemierzalnych parametrów procesowych (np. stopień zanieczyszczenia wybranej powierzchni ogrzewalnej kotła, temperatura spalin). Optymalizacja pracy zdmuchiwaczy sadzy następuje z uwzględnieniem wybranych parametrów procesowych, takich jak zanieczyszczenie każdej powierzchni ogrzewalnej kotła, temperatura spalin w wybranych punktach kotła, ilość wtryskiwanej wody w przegrzewaczach pary. W celu zapobiegania negatywnym skutkom wynikającym z ciągłego, ale również ze zbyt rzadkiego zdmuchiwania sadzy, dla każdej grupy zdmuchiwaczy ustalany jest minimalny i maksymalny czas oczekiwania między dwoma cyklami zdmuchiwania. Moduł SR::BCM samodzielnie rozpoznaje wzrost całkowitego zanieczyszczenia powierzchni ogrzewalnych i automatycznie dostosowuje strategię zdmuchiwania do nowych warunków pracy kotła. W systemie zastosowany został algorytm *fuzzy logic* (logika rozmyta).

5.5. SR::Validate

Moduł SR::Validate [5.6, 5.7] jest rozszerzeniem modelu termodynamicznego układu technologicznego, który jest wykorzystywany w aplikacji SR::EPOS. System ten bazuje na modelu symulacyjnym opracowanym w programie Ebsilon®Professional pozwalającym na korygowanie wartości pomiarowej, która jest poddawana procedurze walidacji w wybranym komponencie modelu. W procesie walidacji oprócz wartości wielkości mierzonej i odpowiadającej jej niepewności pomiarowej wykorzystywane są równania zachowania masy i energii. Wynikiem obliczeń jest określenie najbardziej prawdopodobnego stanu procesu technologicznego i skorygowanych niepewności obliczonych wielkości wybranych parametrów techniczno-ekonomicznych. Moduł SR::Validate do zwiększenia wiarygodności zainstalowanej aparatury pomiarowej w układzie, a także

zmniejszenia niepewności pomiarów podczas badań odbiorowych i gwarancyjnych w instalacjach energetycznych, układach elektrowni i elektrociepłowni wykorzystuje matematyczną metodą walidacji danych. System ten informuje użytkownika o zmianach i ewentualnych uszkodzeniach aparatury pomiarowej, a także pozwala na uzyskiwanie informacji na temat konieczności przeprowadzenia przeglądu wybranych urządzeń pomiarowych.

5.6. SR::SPM – monitoring rurociągów pary świeżej

Ze względu na bezpieczeństwo pracy i konieczność utrzymania ciągłości procesu technologicznego bardzo ważne jest prognozowanie trwałości oraz określanie stopnia zużycia rurociągów energetycznych. Moduł SR::SPM (Steam Pipe Monitoring) [5.8] pozwala na prowadzenie monitoringu rurociągów parowych w trybie *on-line*. Jest to bardzo istotne działanie szczególnie w przypadku rurociągów, których parametry pracy (ciśnienie i temperatura) powodują znaczące obciążenia materiału, z którego rurociągi te są wykonane (np. rurociągi pary świeżej i wtórnej). Obciążenie rurociągu określane jest w trybie ciągłym na podstawie pomiarów siły i przemieszczania elementu w kierunku poziomym i pionowym. Oprócz wartości pomiarowych ciśnienia, temperatury i przemieszczania się rurociągów uwzględniane są również rzeczywiste geometrie komponentów przewodów rurowych. Zastosowana procedura umożliwia uwzględnienie w ocenie stanu rurociągu również przebiegu eksploatacji danego elementu. Obliczenia wykonywane są zgodnie ze standardem VGB R 506. System SR::SPM umożliwia wykonywanie w trybie *on-line* cyklicznych (np. co 5–15 minut) symulacji rurociągów, na których zainstalowana jest dedykowana aparatura pomiarowa. Strategia utrzymaniowa w zakresie wyznaczania żywotności rurociągów, która ukierunkowana jest na bieżącą ocenę stanu technicznego, pozwala na generowanie większych korzyści technicznych i ekonomicznych w porównaniu do cyklicznych badań diagnostycznych, które prowadzone są w założonych odstępach czasu.

Literatura

[5.1] Steag Energy Services: Eliminate doubt with precision planning, https://www.steag-systemtechnologies.com/en/products/performance-monitoring [dostęp: 31.07.2020].

[5.2] Steag: Predictive analytics. SR::SPC. Field-tested real-time monitoring of important process and condition performance indicators, https://www.steag-system technologies.com/uploads/pics/PDB_SR-SPC_Predictive_Analytics_eng.pdf [dostęp: 31.07.2020].

[5.3] Steag Energy Services: Fact sheet. Machine learning and big data for detecting system anomalies, https://www.steag-systemtechnologies.com/uploads/pics/Fact_Sheet_SR-SPC_ML_Machine_Learning_and_Big_Data_eng.pdf [dostęp: 31.07.2020].
[5.4] Flextek: Predykcja Machine Learning, https://flextek.pl/energetyka/srspc-ml-predykcja-machine-learning/ [dostęp: 31.07.2020].
[5.5] Steag: Optimized soot blowing management SR::BCM, https://www.steag-system technologies.com/uploads/pics/PDB_SR-BCM_Soot_Blowing_Management_eng.pdf [dostęp: 31.07.2020].
[5.6] Steag Energy Services: Make your process evaluation more reliable, https://www.steag-systemtechnologies.com/de/produkte/validierung [dostęp: 31.07.2020].
[5.7] Steag Energy Services: SR::Validate turns measured data acquired by the DCS into reliable data base, https://www.steag-systemtechnologies.com/uploads/pics/Factsheet_SR-Validate_Data_Validation_eng_01.pdf [dostęp: 31.07.2020].
[5.8] Steag: SR::SPM. Steam Pipe Monitoring. Service life monitoring of highly--stressed steam pipes, https://www.steag-systemtechnologies.com/uploads/pics/PDB_SR-SPM_Steam_Pipe_Monitoring_eng.pdf [dostęp: 31.07.2020].

6. Podsumowanie

W książce przedstawiono metodologie budowy własnych modeli oraz przeprowadzania obliczeń i symulacji komputerowych układów energetycznych. W pierwszej części przedstawione zostały podstawowe komponenty służące do budowy modeli (komponenty modeli fizycznych, komponenty logiczne, komponenty definiowania zmiennych wejściowych, komponenty programowane przez użytkownika), metody ich prawidłowego łączenia, podstawowe płyny stosowane do modelowania obiegów termodynamicznych, jak również dostępne metody definiowania danych wejściowych i warunków brzegowych w modelu. W opracowanym materiale można znaleźć także scharakteryzowane moduły wspomagające pracę w programie Ebsilon (EbsOptimize, EbsScript, EbsOpen, EbsBoiler, GTLib VTU, EbsSolar, EbsHTML, EbsValidate) oraz opis rozwiązań inżynierskich i systemów informatycznych wykorzystujących program Ebislon®Professional (SR::EPOS, SR::SPC, SR::SPC ML, SR::BCM, SR::Validate, SR::SPM).

Podręcznik zawiera 11 zróżnicowanych ćwiczeń z zakresu modelowania pracy energetycznych układów parowych, gazowych i gazowo-parowych. Opracowane przykłady są bezpośrednio związane z obiegami parowymi oraz parowo-gazowymi, stanowiącymi największy lokalny udział w produkcji energii elektrycznej i ciepła. Do opracowania pełnych modeli i przeprowadzenia obliczeń wykorzystanych zostało kilkadziesiąt różnych komponentów. Przedstawiony kod Ebsilon®Professional zawiera ponad 100 innych komponentów, niewykorzystanych w prezentowanych przykładach, których opis i przykłady można znaleźć w literaturze (panele fotowoltaiczne, kolektory słoneczne, turbiny wiatrowe, zbiorniki stratyfikacyjne, zasobniki do magazynowania gorącej wody, ogniwa paliwowe, układy absorberów, układy odsalania, układy chłodzenia, pompy ciepła). Komponenty te dotyczą nowych i ciągle rozwijanych technologii energetycznych i można stosować je w kombinacji z przedstawionymi w książce obiegami parowymi i gazowymi. Stanowi to o nowoczesności programu oraz jego przyszłym potencjale jako narzędzia do projektowania, monitorowania i optymalizacji nowoczesnych urządzeń energetycznych. Przykłady stosowania obliczeń i symulacji komputerowych

z wykorzystaniem oprogramowania Ebsilon®Professional wykonanych przez pracowników krajowych uczelni wyższych oraz instytutów badawczych znaleźć można w następujących pozycjach: [6.1–6.22].

Przed przykładami przedstawione zostało wprowadzenie teoretyczne mające na celu przybliżenie podstaw obiegów Clausiusa–Rankine'a oraz Joule'a–Braytona, podstaw analizowania pracy kotła parowego oraz metod wyznaczania podstawowych wskaźników, sprawności i strat występujących podczas pracy obiegów. Podczas opracowania ćwiczeń dotyczących obiegów parowych koncentrowano się na prawidłowym opracowaniu modeli, wprowadzeniu danych wejściowych, wizualizacji pracy układu w postaci wykresu obiegu oraz wyznaczeniu podstawowych parametrów pracy, takich jak moc elektryczna brutto i netto, sprawność energetyczna bloku czy moc potrzeb własnych. Metody podnoszenia sprawności wytwarzania zostały zademonstrowane przez rozbudowanie układu o część międzystopniowego przegrzewu pary oraz wyznaczenie charakterystyki zmiany sprawności bloku w funkcji ciśnienia pary wtórnie przegrzanej. Poprawa sprawności energetycznej została przedstawiona także przez opracowanie bloku pracującego w skojarzeniu (elektrociepłownia) i wykorzystanie energii cieplnej do podgrzania wody sieciowej. Obliczenia wysokosprawnego obiegu parowego zostały wykonane dzięki opracowaniu modelu bloku elektrowni na parametry nadkrytyczne z wtórnym przegrzewem pary, z układem wysoko- i niskoprężnych podgrzewaczy regeneracyjnych dla wody zasilającej kocioł oraz trzystopniową turbiną parową. Przykład kotła parowego zasilanego paliwem stałym został zaprezentowany w postaci rozbudowanego wymiennika ciepła, zbudowanego z wykorzystaniem dodatkowych komponentów z biblioteki EbsBoiler. W zadaniu przedstawiony został sposób określania sprawności kotła parowego z zastosowaniem specjalnych komponentów w programie Ebsilon®Professional.

W części dotyczącej obiegów gazowych i gazowo-parowych wiele miejsca poświęcono opracowaniu modelu turbiny gazowej. Do tego celu można wykorzystać poszczególne komponenty sprężarki, komory spalania, ekspandera oraz generatora lub dostępne w programie Ebsilon biblioteki (moduł dodatkowy GTLib VTU) zawierające gotowe zestawy turbin gazowych wraz z podstawowymi charakterystykami energetycznymi i krzywymi korekcyjnymi. W kolejnym przykładzie opracowany model turbiny gazowej został rozbudowany o układ odzysku ciepła ze spalin z kotłem odzyskowym na cele produkcji pary technologicznej. Dodanie do modelu kotła odzyskowego, zbudowanego z wykorzystaniem komponentu podgrzewacza, parownika oraz przegrzewacza, pozwoliło stworzyć model elektrowni gazowo-parowej, w której wytwarzanie energii elektrycznej odbywa się w dwóch generatorach, w obiegu gazowym i parowym. Układem osiągającym najwyższe sprawności jest natomiast blok elektrociepłowni

gazowo-parowej z rozbudowaną częścią turbiny parowej i możliwością odzysku ciepła z pary na cele podgrzania wody sieciowej w wymienniku ciepłowniczym.

Każde z opracowanych ćwiczeń składa się z czterech części: *Cel ćwiczenia*, *Opis zadań do wykonania*, *Instrukcja wykonania modelu, Zadanie dodatkowe* i *Podsumowanie*. Ćwiczenia, poza zdefiniowanym problemem i zestawem niezbędnych danych wejściowych, zawierają pełną instrukcję wykonania modelu i przeprowadzenia obliczeń. Do każdego z nich zostało przygotowane zadanie dodatkowe, którego rozwiązanie nie zostało w pełni przedstawione, ale które stanowi kontynuację zadania podstawowego. Wszystkie ćwiczenia zostały przedstawione w analogiczny sposób, aby zapewnić czytelność oraz umożliwić ciągłość pracy z zawartym w książce materiałem. Całość książki została przygotowana tak, aby umożliwić pracę nad wybranym zagadnieniem, jak również stanowi kompletny materiał do wykorzystania podczas kursu oraz zajęć w ramach przedmiotów z zakresu modelowania matematycznego i wykonywania obliczeń systemów energetycznych.

Literatura

[6.1] Bujalski W., Szczęśniak A., Bondar Ł., Futyma K., Lewandowski J.: A new approach of modelling an absorption heat pump modelling integrated with heat and power unit, [w:] ECOS 2019 – Proceedings of the 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Volume 2019 – June, 2019, s. 4017–4025.

[6.2] Czop M., Poranek N., Czajkowski A., Wagstyl Ł.: Fuels from waste as renewable energy in distributed generation on the example of the ORC system, Recycling, Volume 4, Issue 3, 2019, Article number 26.

[6.3] Chmielniak T., Mońka P., Pilarz P.: Investigation of a combined gas-steam system with flue gas recirculation, Chemical and Process Engineering – Inżynieria Chemiczna i Procesowa, Volume 37, Issue 2, 2016, s. 305–316.

[6.4] Chmielniak T., Pilarz P.: Modelowanie procesów redukcji tlenków azotu w spalinach bloków węglowych, Rynek Energii, Tom 114, Numer 5, 2014, s. 63–69.

[6.5] Gładysz P., Stanek W., Czarnowska L., Węcel G., Langørgen Ø.: Thermodynamic assessment of an integrated MILD oxyfuel combustion power plant, Energy, Volume 137, 2017, s. 761–774.

[6.6] Jaszczur M., Dudek M., Rosen M.A., Kolenda Z.: An analysis of integration of a power plant with a lignite superheated steam drying unit, Journal of Cleaner Production, Volume 243, 2020, Article number 118635.

[6.7] Jędrzejewski J., Hanuszkiewicz-Drapała M.: Analyses of the efficiency of a high-temperature gas-cooled nuclear reactor cogeneration system generating heat for the sulfur–iodine cycle, Journal of Energy Resources Technology, Volume 140, Issue 11, 2018, Article number 112001.

[6.8] Kalina J.: Techno-economic assessment of small-scale integrated biomass gasification dual fuel combined cycle power plant, Energy, Volume 141, 2017, s. 2499–2507.

[6.9] Kalina J., Świerzewski M., Szega M.: Simulation based performance evaluation of biomass fired cogeneration plant with ORC, Energy Procedia, Volume 129, 2017, s. 660–667.

[6.10] Kotowicz J., Michalski S.: Thermodynamic and economic analysis of a supercritical and an ultracritical oxy-type power plant without and with waste heat recovery, Applied Energy, Volume 179, 2016, s. 806–820.

[6.11] Król J., Ocłoń P.: Economic analysis of heat production in existing medium size combined heat and power plant, with respect to the CO_2 allowances purchasing cost, Energy Conversion and Management, Volume 171, 2018, s. 110–125.

[6.12] Łukowicz H., Mroncz M.: The impact of the CO_2 separation system integration with a 900 MW_e power unit on its thermodynamic and economic indices, Energy, Volume 92, Part 2, 2015, s. 212–220.

[6.13] Madejski P., Żymełka P.: Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling, Energy, Volume 197, 2020, Article number 117221.

[6.14] Madejski P., Żymełka P., Węzik R., Kubiczek H.: Gas fired plant modeling for monitoring and optimization of electricity and heat production, Journal of Power Technologies, Volume 97, Number 5, s. 455–462.

[6.15] Monka P.: Analysis of a gas system with a recirculation of the flue gases and carbon dioxide capture, International Journal of Thermodynamics, Volume 19, Issue 2, 2016, s. 62–69.

[6.16] Plis M., Rusinowski H.: A mathematical model of an existing gas-steam combined heat and power plant for thermal diagnostic systems, Energy, Volume 156, 2018, s. 606–619.

[6.17] Stanek W.: Analiza egzergetyczna w teorii i praktyce. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.

[6.18] Stępczyńska-Drygas K., Łukowicz H., Dykas S.: Calculation of an advanced ultra-supercritical power unit with CO_2 capture installation, Energy Conversion and Management Volume 74, 2013, s. 201–208.

[6.19] Wołowicz M., Milewski J., Futyma K., Szczęśniak A.: The construction of the mathematical model of supercritical CO_2 cycles using EBSILON software, AIP Conference Proceedings, Volume 2116, 2019, Article number 450085.

[6.20] Żymełka P., Nabagło D., Janda T., Madejski P.: Online monitoring system of air distribution in pulverized coal-fired boiler based on numerical modeling, Archives of Thermodynamics, Volume 38, Number 4, s. 109–125.

[6.21] Żymełka P., Szega M., Madejski P.: 2020: Techno-economic optimization of electricity and heat production in gas-fired combined heat and power plant with a heat accumulator, Journal of Energy Resources Technology, Volume 142, Issue 2, s. 1–15.

[6.22] Żymełka P., Żyrkowski M., Bujalski M.: Analysis of coal-fired power unit operation in reduced minimum safe load regime, [w:] Thermal power plants. New trends and recent developments, ed. Madejski P., InTech Open, 2018.

Dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH

Obecnie zatrudniony na stanowisku profesora uczelni w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Studia ukończył na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w 2009 r. Doktoryzował się w 2014 r., a stopień doktora habilitowanego otrzymał w roku 2020. W latach 2010–2018 pracował na stanowiskach Starszego Specjalisty ds. Badań Pomiarowych AKPiA oraz Starszego Specjalisty ds. Badań Termodynamicznych w Dziale Badań i Rozwoju grupy energetycznej EDF Polska SA, a później PGE Energia Ciepła SA. Za swoją działalność badawczo-rozwojową w 2017 roku został laureatem konkursu *Lider Inżynierii poniżej 40* organizowanego przez magazyny „Control Engineering Polska" oraz „Inżynieria & Utrzymanie Ruchu". Jego zainteresowania naukowe skoncentrowane są głównie wokół badań nad efektywnością procesów przepływowo-cieplnych i procesów spalania w technologiach energetycznych, monitorowania i modelowania pracy bloków energetycznych oraz kotłów parowych oraz modelowania CFD pracy maszyn i urządzeń energetycznych. Prowadzi wykłady z takich przedmiotów jak technologie energetyczne, termodynamika, kotły parowe, elektrownie i elektrociepłownie. Jest autorem i współautorem ponad 80 prac, w tym artykułów, rozdziałów w książkach i monografiach oraz recenzowanych materiałów konferencyjnych, jak również redaktorem naukowym książki *Thermal Power Plants: New Trends and Recent Developments* wydanej w 2018.

Mgr inż. Piotr Żymełka

Pracuje w Elektrowni „Rybnik" należącej do Polskiej Grupy Energetycznej Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna (PGE GiEK SA) na stanowisku Głównego Specjalisty w obszarze inwestycji i rozwoju. Jest absolwentem Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, gdzie obecnie przygotowuje pracę doktorską w ramach programu *Doktorat wdrożeniowy*. Jej tematyka obejmuje optymalizację wytwarzania energii elektrycznej i ciepła na przykładzie wybranej elektrociepłowni gazowej. W latach 2015–2018 pracował na stanowisku Specjalisty ds. Badań Termodynamicznych w Dziale Badań i Rozwoju grupy energetycznej EDF Polska SA, a później PGE Energia Ciepła SA. Jest laureatem konkursu na najlepszą pracę dyplomową magisterską wykonaną i obronioną w roku 2015 na kierunku Energetyka oraz Mechanika i Budowa Maszyn organizowanego przez Stowarzyszenie Wychowanków Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół zagadnień modelowania matematycznego, bilansowania i optymalizacji procesów cieplnych w układach elektrowni i elektrociepłowni. Jest autorem lub współautorem ponad 20 artykułów naukowych i recenzowanych referatów konferencyjnych.

Niniejsza książka ma na celu wprowadzenie czytelnika w tematykę modelowania komputerowego oraz przeprowadzania symulacji pracy systemów energetycznych z wykorzystaniem oprogramowania Ebsilon®Professional firmy Steag. W publikacji znalazło się miejsce zarówno dla teorii, jak i praktycznych ćwiczeń z zakresu przeprowadzania symulacji pracy systemów energetycznych bazujących na technologiach parowych oraz gazowo-parowych. Podręcznik został opracowany z myślą o studentach studiów inżynierskich, magisterskich oraz doktoranckich (m.in. takich dyscyplin jak inżynieria mechaniczna, inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, inżyniera chemiczna), jak również pracowników jednostek naukowo-badawczych pragnących rozpocząć prace z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi i technik komputerowych do modelowania i symulacji pracy systemów energetycznych.

ISBN 978-83-66364-70-7

Plik zabezpieczony